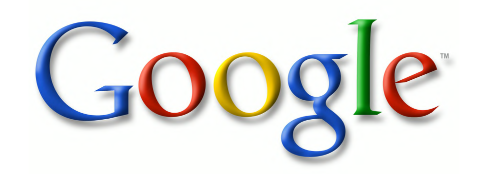














L'UNITÉ

DES

FORCES PHYSIQUES

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.

L'UNITÉ

DES

FORCES PHYSIQUES

ESSAI DE PHILOSOPHIE NATURELLE

PAR

LE R. P. SECCHI

MEMBRE CORRESPONDANT DE L'INSTITUT DE FRANCE
DIRECTEUR DE L'OBSERVATOIRE DE ROME, OFFICIER DE LA LÉGION D'HONNEUR

ÉDITION ORIGINALE FRANÇAISE

PUBLIÉE D'APRÈS L'ÉDITION ITALIENNE SOUS LES YEUX DE L'AUTEUR

PAR

LE Dr DELESCHAMPS

AVEC 56 FIGURES DANS LE TEXTE

PARIS
F. SAVY, LIBRAIRE-ÉDITEUR
24, RUE HAUTEFEUILLE, 24

1869

PRÉFACE

DE LA PREMIÈRE ÉDITION

La grande découverte qui de nos jours préoccupe tous les savants, et qui sera le plus beau titre scientifique de notre époque, est celle de la théorie mécanique de la chaleur; c'est-à-dire la réduction des phénomènes calorifiques à de simples modalités de mouvement. Exposer les bases de cette théorie, en étendre les applications aux agents impondérables et aux autres forces physiques, tel est l'objet du présent ouvrage.

Que l'on ne s'étonne pas de voir un astronome entreprendre de traiter un sujet regardé d'ordinaire comme relevant des physiciens, car certainement la question de la nature des forces intéresse l'astronomie au plus haut point. En effet, il y a deux manières d'envisager les mouvements célestes: ou bien comme de simples effets d'une force abstraite,

la gravité, et la loi élémentaire de cette force une fois connue, tout le reste s'en déduit par voie analytique; ou bien comme les effets d'une cause immédiate appartenant à un ordre plus élevé et dont la gravité elle-même ne serait qu'une conséquence. Tant que l'on se borne à calculer les mouvements planétaires, la première hypothèse suffit aux besoins de l'astronome ; mais, lorsqu'on arrive à chercher l'explication des autres phénomènes que nous présentent les comètes, les aérolithes et le soleil lui-même, elle est insuffisante. Non-seulement les apparences physiques des corps célestes ne peuvent s'expliquer par un principe unique, mais les lois mêmes des mouvements révèlent des perturbations que l'on ne peut négliger. Pour comprendre ces aberrations, il faut recourir à l'action de ces forces qui régissent la matière, que nous connaissons de près et que, pour ainsi dire, nous manions chaque jour.

De récentes observations ont démontré que dans l'espace planétaire s'exercent encore la répulsion calorifique, la résistance du milieu, les actions magnétiques et électriques, et sans nul doute, de même que la lumière, ces forces sont communes à toute la création et lient ensemble les corps les plus éloignés de l'univers.

En présence d'une idée aussi séduisante, celui qui entre dans la carrière astronomique après avoir consacré plusieurs années à l'étude de la physique,

ne peut s'empêcher d'être vivement sollicité à déterminer les relations réciproques de ces forces, à en rechercher les principes, à voir s'il est possible de les ramener toutes à une cause commune. Les remarquables progrès accomplis par la science dans ces dernières années ont fait disparaître les principales difficultés qui écartaient les savants d'un problème aussi complexe, et aujourd'hui on ne pense plus que les forces physiques et celles qui régissent les mouvements des corps célestes soient indépendantes les unes des autres.

Personne n'admet plus l'existence du vide absolu dans l'espace planétaire, les forces ne sont plus regardées comme des qualités occultes de la matière, mais comme de purs effets de mouvement. Ainsi s'ouvre aux spéculations des naturalistes un champ jusqu'ici inexploré.

Une telle synthèse a été toujours pour nous un sujet d'études favori. En 1858, dans une séance de l'Académie Tibérienne, nous lûmes une dissertation sur cet objet qui fut publiée plus tard avec un grand nombre de notes[1]. Depuis ce moment plusieurs personnes manifestèrent le désir de voir cette thèse traitée avec de plus grands détails dans un ouvrage écrit en italien, car jusque-là notre langue ne possédait aucun livre dans lequel les derniers progrès de

[1] Voy. *Giornale Arcadico*, vol. XI, nouvelle série, *De la Corrélation des forces physiques*.

la science fussent exposés et réunis dans un ensemble synthétique. Les nombreux travaux de ma charge ne me permirent pas de m'occuper de ce travail. Seulement dans un second opuscule publié ultérieurement, j'abordai cette question[1], et à cette occasion, par la nature même des oppositions que soulevèrent les idées émises dans ce travail, je pus me persuader que nombre d'idées déjà fortement enracinées dans la science n'étaient pas encore répandues et suffisamment connues parmi nous. Aussi je résolus de consacrer à la rédaction de ces pages les rares moments de liberté que me laissaient mes autres devoirs.

Dans ce livre je n'ai point la prétention de créer une nouvelle philosophie de la nature, je veux seulement exposer les vues théoriques qui chaque jour s'affirment davantage grâce à une étude plus sérieuse des phénomènes. Le lecteur verra que ces idées nouvelles sont la conséquence directe des travaux accomplis par les savants qui illustrent notre siècle. Qu'il nous suffise de citer Mayer, Séguin, Joule, Thompson, Grove, Hirn, Lamé, Moigno, Tyndall, Clausius, Dumas, Cantoni, Fusinieri, Zantedeschi, Bizio, Turazza, Graham, Bunsen, Foucault, Dupré, etc., etc., qui tous ont fait progresser et ont vulgarisé cette théorie en un très-petit nombre d'années. Et ce seul fait, à défaut de tout autre, parle assez haut pour

[1] *Lettre sur un problème cosmologique*. Rome (Marini), 1862.

montrer que l'âge actuel n'a rien à envier aux autres époques scientifiques, même aux plus glorieuses.

Je ne cache pas qu'ayant voulu exposer cette synthèse scientifique de manière à la rendre accessible à la majorité des lecteurs, j'ai rencontré des difficultés plus sérieuses que je ne me les étais figurées tout d'abord. Il fallait dépouiller les démonstrations de leur appareil de formules et de calculs, sans leur faire perdre leur force; de plus, les principes fondamentaux ne pouvaient être établis par la voie des mathématiques. En effet, l'analyse géométrique, fort utile quand on veut tirer d'un principe toutes ses conséquences et qui par là donne de précieux moyens de vérification, est tout à fait impuissante à prouver directement la vérité du principe lui-même.

La partie expérimentale elle-même, pour être traitée d'une manière convenable, m'a demandé une grande attention. Sans entrer dans le détail des expériences, ce qui est le propre des ouvrages spéciaux, il fallait rappeler les résultats obtenus, de telle façon qu'on pût en comprendre la signification et l'importance, alors même qu'on n'en posséderait pas une complète connaissance préliminaire. Autrement, j'aurais été ennuyeux pour les uns et inintelligible pour les autres. Me trouvant ainsi enfermé entre deux écueils également dangereux, et dans l'impossibilité d'échapper à l'un et à l'autre, afin d'éviter le second, j'ai préféré donner dans le premier : en un mot, crai-

gnant d'être incomplet, j'ai préféré être un peu long. Le grand nombre de faits qui se trouvent réunis dans cet ouvrage, surtout en certaines parties, suffisent à montrer qu'un lien commun réunit les diverses branches de la physique, et alors même que le présent travail n'atteindrait pas le but principal en vue duquel il a été entrepris, ce résultat bien que secondaire ne serait certainement pas sans profit pour le lecteur. Le livre que nous présentons est donc rédigé de manière à permettre aux jeunes gens déjà instruits des faits élémentaires de la physique de compléter leurs études, en leur donnant une notion générale de la partie la plus élevée de la science.

Je crois utile de dire dès maintenant que, vu la multiplicité et la difficulté des matières traitées dans les pages qui suivent, leur lecture exigera une attention soutenue. Je ne me suis pas proposé d'écrire une de ces œuvres moitié littéraires moitié scientifiques, où la science est présentée sous une forme attrayante. Ce genre de littérature, très en faveur depuis quelques années, a une grande utilité au point de vue de la vulgarisation scientifique, mais il ne contribue en rien au progrès de la science. Mon intention a été de faire quelque chose qui profite au développement de la philosophie naturelle. Les difficultés n'ont pas fait défaut, mais j'ai toujours été soutenu par la pensée que, quand même j'échouerais dans mon entreprise, elle aurait au moins cela d'utile

que peut-être elle donnerait à des savants plus habiles que moi le désir de trouver la solution qui m'avait échappée, en leur montrant combien de précieuses données sont déjà acquises au problème.

C'eût été chose facile que d'introduire en maints passages d'attrayantes digressions, car un sujet aussi vaste se prête facilement à des développements d'un haut intérêt. Je me serais par là rendu plus agréable à lire, mais aussi ces déails n'auraient pas manqué de distraire le lecteur et de l'empêcher de suivre le fil de la démonstration. Et même sous ce rapport, pour faciliter l'enchaînement des raisonnements, j'ai, à la fin de chaque livre, résumé les choses principales qui y sont développées; si bien qu'en lisant seulement le dernier chapitre de chaque livre, on peut prendre une idée générale de l'ouvrage entier.

J'avais d'abord eu l'intention d'ajouter quelques notes, tant pour exposer diverses théories à peine ébauchées dans le texte, que pour démontrer par le calcul certaines propositions données comme exactes, et même pour en indiquer d'autres plus nouvelles; je ne l'ai pas fait, car déjà l'étendue de l'ouvrage dépassait les bornes dans lesquelles j'espérais pouvoir le renfermer.

Durant[1] l'impression la science a fait des acquisitions importantes. J'en ai profité au fur et à mesure que j'en avais connaissance, et j'ai vu avec grand

[1] L'édition fut commencée dans les premiers jours d'août 1863.

plaisir que tous les faits nouveaux étaient autant de preuves nouvelles en faveur de ma thèse, et qu'aucun d'eux ne s'inscrivait en faux contre les vues théoriques exposées dans cet essai. Je suis donc en droit d'espérer que l'exactitude de ces théories se confirmera chaque jour davantage à mesure que les phénomènes de la nature seront mieux connus.

Peut-être considérera-t-on certaines conjectures ici exposées comme un peu hasardées; mais comme cela ne veut pas dire, tant s'en faut, qu'elles sont erronées et dénuées de tout fondement, j'espère que le lecteur impartial, avant de les rejeter, voudra bien les examiner. De plus ce sont des conjectures, et nous ne les donnons que pour telles.

Ce dont je ne saurais m'excuser aussi facilement, c'est d'avoir osé embrasser un sujet trop vaste et de beaucoup supérieur à mes forces, et j'avoue que ce travail une fois terminé, n'aurait pas été imprimé, si l'on ne m'avait pas vivement sollicité à en entreprendre la publication. Sans cette proposition, que j'ai acceptée avec plaisir, je me serais regardé comme amplement récompensé de ma peine par la satisfaction que j'éprouvais d'avoir pu enfermer dans une synthèse générale toutes les forces de la nature. Puissé-je avoir été assez heureux dans l'exposé de ma théorie pour faire goûter aux autres cette même satisfaction.

A. Secchi.

Rome, 10 avril 1864.

PRÉFACE

DE LA PRÉSENTE ÉDITION

Ce livre, publié pour la première fois en 1864, rencontra dans le public scientifique un si favorable accueil que l'édition se trouva promptement épuisée. Bien qu'écrit en italien, il obtint en France un succès assez grand pour me déterminer à accepter la proposition du docteur Deleschamps d'en faire une édition française. Toutefois cette édition n'est pas une simple traduction de la première ; elle présente des améliorations importantes. L'ouvrage original, rédigé et imprimé en quelques mois à peine, ne pouvait manquer de se ressentir d'une telle précipitation ; aussi les quelques petites inexactitudes qui s'y étaient glissées ont été corrigées, et quelques passages un peu obscurs rendus plus clairs.

En outre, dans ces cinq années, la science a avancé assez rapidement. Nous sommes heureux de constater

qu'aucune des doctrines fondamentales énoncées dans cet ouvrage n'a été ébranlée par les récentes découvertes, et qu'au contraire un grand nombre de détails ont été confirmés et élucidés d'une manière remarquable, et se trouvent appuyés sur des preuves nouvelles. Nous avons donc profité de ces progrès, et on trouvera consignées à leur place les données nouvelles acquises à la science.

Cependant nous n'avons pas voulu changer la forme de l'ouvrage ; au contraire, nous avons cherché à conserver son originalité. Il y avait pour cela une excellente raison : en effet, dans cet intervalle, bien des professeurs et des vulgarisateurs habiles ont cherché à répandre ces doctrines, soit par des articles, soit par des ouvrages spéciaux. En modifiant trop notre rédaction, nous aurions couru le risque de paraître avoir emprunté à ceux que nous avions réellement précédés et qui quelquefois même nous ont simplement copiés.

L'ouvrage ayant été écrit dans le but spécial d'exposer les doctrines de la physique moderne, il n'a pas la prétention de faire connaître les détails particuliers de la science, et surtout ceux qui tiennent à la partie pratique et technique. Cependant nous avons développé davantage la théorie de la chaleur pour préparer suffisamment le lecteur à la lecture des ouvrages spéciaux où il pourra trouver les renseignements qui pourraient l'intéresser sur cette bran-

che. Enfin de nouvelles figures propres à éclairer le lecteur ont été ajoutées, et rendront plus saisissables certains phénomènes.

Si l'on compare le langage actuel des savants à celui qui était en usage il y a cinq ans, on trouvera de grandes différences : certaines idées émises pour la première fois dans ce livre, et regardées comme prématurées, à l'époque où parut la précédente édition, sont acceptées aujourd'hui, et sont même devenues vulgaires. Qu'il nous suffise de citer la rotation atomique, la relation des pouvoirs optiques et électriques des corps, l'influence des pressions latérales des fluides étendue à l'électricité, l'assimilation du courant électrique à un flux d'éther, la théorie de l'induction électro-dynamique, etc.

Nous sommes loin de croire que les savants aient été amenés à ces idées nouvelles par la lecture de notre livre ; mais elles leur ont été imposées par l'observation des faits ; nous n'avons qu'à nous féliciter d'être arrivé aux mêmes conclusions par une voie plus courte.

Trois ordres de phénomènes principaux constituent les manifestations des forces physiques analysées dans cet ouvrage, ce sont : la chaleur, les radiations et l'électricité. La théorie de la chaleur est déjà constituée sur des bases solides. Depuis la publication de notre essai en 1864, l'étude de la radiation a fait de grands progrès, néanmoins l'obscurité qui

enveloppait jadis la manière d'agir des vibrations transversales persiste encore aujourd'hui. Le raisonnement nous conduit là à des conclusions irrécusables, mais dont l'imagination ne peut pas encore saisir clairement le mécanisme. Sans nuire à la science, ces difficultés jettent une certaine inquiétude dans l'esprit du savant qui se trouve pour ainsi dire arrêté dans son essor.

En électricité, les complications sont encore plus grandes. L'observation nous montre des relations frappantes et concluantes entre les phénomènes statiques et dynamiques, et de nombreuses analogies entre ceux-ci et les mouvements des fluides; mais lorsqu'on vient aux détails, on rencontre des difficultés sérieuses à concevoir le mécanisme des phénomènes qui reste ainsi comme enveloppé de mystère.

Ce sont surtout ces difficultés que nous avons cherché à vaincre : y sommes-nous parvenus? Le lecteur en jugera. Nous avons au moins indiqué aux chercheurs les points dignes de leur attention, et dans quel sens ils doivent interroger la nature. Si les physiciens expérimentateurs dirigent convenablement leurs efforts vers l'étude des inductions électro-dynamiques, la science ne tardera pas à se débarrasser de ces incertitudes. Nous avons essayé d'indiquer cette route en réunissant dans la présente édition un nombre plus considérable de phénomènes

dus au mouvement des fluides propres à éclaircir la théorie électro-dynamique. Ainsi nous nous sommes efforcés de frayer la voie que d'autres plus heureux parcoureront plus avant.

Comme le goût des études théoriques se développe chaque jour davantage, on est en droit d'espérer que les lacunes ne resteront pas longtemps sans être comblées. Le meilleur moyen pour arriver plus rapidement à ce résultat, est de commencer à introduire dans l'enseignement élémentaire une coordination systématique et réguliere des phénomènes, laissant de côté l'ordre historique des découvertes qui jusqu'ici a fourni le plan de presque tous les traités spéciaux.

On nous a reproché d'avoir suivi de trop près dans notre ouvrage le genre d'exposition qui convient à un précis élémentaire de physique. Je crois ce reproche peu fondé. Les détails dans lesquels nous sommes entrés étaient nécessaires, car les faits particuliers sont la pierre de touche des théories.

En effet, quiconque embrasse les phénomènes de la nature dans une généralisation un peu élevée, est porté à voir tous les faits concorder de la manière la plus heureuse avec les idées systématiques qui le guident. Ainsi, quand les nuages sont amoncelés à l'horizon, leurs masses bizarrement groupées paraissent à quelques-uns dessiner la figure d'un énorme géant, alors que d'autres y retrouvent la riche ordonnance d'un palais fantastique. Mais agir de la

sorte ce n'est pas faire avancer la science, au contraire c'est nuire à son progrès.

Du reste, si l'on croit utile d'introduire notre système dans l'enseignement classique, assurément les détails dans lesquels nous sommes entrés ne sont pas inutiles, et même on reconnaîtra bien vite que sous ce rapport notre livre est incomplet.

Nous le répétons : les détails n'ont d'autre but que de donner ou les éléments ou la contre-épreuve des théories, et si dans quelques chapitres le lecteur les trouvait surabondants, il pourra très-bien les laisser de côté.

Un mot sur la traduction. Le style italien, surtout celui de la discussion scientifique, est fort différent du style français : de là une difficulté considérable dont seul peut se rendre compte celui qui en a fait l'essai; aussi s'est-on appliqué principalement à rendre d'une manière rigoureuse la pensée de l'auteur, même parfois au détriment de la forme et de l'élégance de l'exposition. L'édition française de l'*Unité des forces physiques* n'a pas la prétention d'être une œuvre de littérature scientifique, résultat auquel il est toujours bien difficile d'arriver en traduisant un ouvrage du genre de celui-ci et surtout lorsqu'il est écrit en italien. Nous espérons cependant que la lecture de ce livre, qui, pour certains passages, a dû exiger un grand travail et une parfaite intelligence du sujet de la part de notre traducteur, paraîtra facile;

il n'a reculé devant aucune espèce de difficulté pour conserver le sens exact de l'original, en s'efforçant toujours le plus possible de se conformer aux exigences de la belle langue française.

A. Secchi.

Rome, ce 28 février 1869.

INTRODUCTION

La science dont le but est la connaissance des forces physiques régissant l'Univers est entrée depuis ces dernières années dans une nouvelle phase, quant à sa manière d'envisager les phénomènes de la matière inorganique. Comme elle s'est montrée féconde en utiles applications, de toutes parts elle a été cultivée avec ardeur; aussi a-t-elle progressé à pas de géant. Les méthodes scientifiques, l'expérience et l'observation sont devenues des puissances; franchissant l'enceinte étroite du laboratoire des savants, elles ont été mises en œuvre par de riches sociétés commerciales et par les gouvernements éclairés. Ainsi il a été possible de vérifier sur une vaste échelle les conséquences tirées par les hommes d'étude de leurs spéculations théoriques et d'étendre le champ de l'expérimentation.

L'emploi de la vapeur dans les machines motrices, de l'électricité dans la télégraphie et la métallurgie,

les applications de la chimie à l'industrie et aux arts usuels, ont provoqué une série de recherches qui ont éclairé la théorie de la constitution des corps d'un jour tout nouveau. De nombreuses opinions, acceptées généralement jusqu'ici, sont abandonnées; un lien inattendu a été trouvé entre les divers agents de la nature, que l'on croyait indépendants les uns des autres, et on a entrevu une voie nouvelle qui peut conduire à la solution du grand problème, c'est-à-dire à la connaissance des forces régissant la matière.

Depuis longtemps les forces ont été classées et réduites à un petit nombre : chaleur, lumière, électricité, magnétisme, attractions moléculaires, affinités chimiques, gravitation universelle, sont les divers principes à nous connus qui expliquent tous les phénomènes de la matière. Quelle est la nature de ces agents? Le problème, pendant longtemps mystérieux ou mal compris, est aujourd'hui envisagé sous un aspect nouveau et se simplifie d'une manière admirable. Pour la physique moderne, les forces sont des modes de mouvement. D'après les nouvelles théories, une substance impondérable, impalpable, incoercible, répandue partout, nommée éther, occupe l'univers, et détermine tous les phénomènes dont nous avons parlé, en agissant d'une façon purement mécanique. Mais de quelle manière se produisent ces phénomènes? Quel lien existe entre ces manifestations en

apparence si diverses? Seuls, les faits bien observés et bien coordonnés nous peuvent éclairer dans cette discussion difficile, et toute théorie qui aspire à se formuler doit être précédée par un exposé et une revue méthodique des données fournies par l'expérience. Après avoir accompli ce travail, et seulement alors, on peut recourir au raisonnement et aux hypothèses afin de combler les lacunes qu'auront laissées l'observation et l'expérimentation.

Coordonner le nombre immense des phénomènes par lesquels se manifestent à nous les forces de la nature, en montrer les liaisons mutuelles, c'est là ce que j'ai tenté de faire dans ces pages, spécialement destinées à la jeunesse studieuse. Toutefois la lecture de notre travail sera peut-être d'une certaine utilité à ceux qui déjà connaissent la science ; car en sériant les faits connus, en les présentant sous un point de vue convenable, et en rapprochant ainsi les diverses parties de nos connaissances, de nouveaux horizons se découvrent et les vérités s'éclairent les unes par les autres. Je me suis efforcé autant que possible de ne pas introduire mes opinions personnelles dans la discussion, et je ne m'y suis décidé que là où certains desiderata m'autorisaient à apporter quelques compléments aux travaux des autres. Puissent mes efforts ne pas être jugés téméraires.

Réduire toutes les forces de la nature à un principe unique, voilà l'expression de la tendance

scientifique de l'époque. Mais avouons que jusqu'à présent le chemin n'est pas encore complétement frayé ; il présente de grandes lacunes : heureux celui qui saura les combler.

Un savant distingué a essayé la synthèse physique, en excluant toute cause autre que la matière pondérable. Pour moi, je tente une voie différente. Le lecteur appréciera de quel côté est la vérité. On reconnaitra facilement que la différence entre les deux théories n'est pas aussi grande qu'elle paraît à première vue, et laissant de côté les points secondaires encore douteux, je suis convaincu qu'en cherchant à réunir les parties déjà achevées de ce grand édifice, on arrivera plus facilement à son couronnement. Jusqu'à présent les savants modernes ont tenu en faible estime les travaux de ce genre : aux yeux de la plupart d'entre eux, colliger les faits vaut mieux que tenter une synthèse scientifique. Disons toutefois que la réaction contre cet éloignement systématique s'accuse chaque jour davantage. Il devait en être ainsi, car, de même qu'on jugerait absurde un homme qui sans cesse rassemblerait des matériaux sans jamais penser à édifier, aussi la connaissance de la constitution de l'univers et de ses lois étant l'unique objet de la science, les savants feraient fausse route si, bornant leurs efforts à accumuler des observations, ils ne jetaient de temps en temps un coup d'œil rétrospectif sur les connaissances déjà acquises, au moins

pour savoir quelles sont les parties faibles de l'édifice scientifique, et quels problèmes réclament leurs travaux. De cette manière, on prépare à la génération future une route qui la conduira à des connaissances dont la découverte nous est peut-être impossible aujourd'hui. Tel est l'unique objet de ce travail, et je serai le premier à applaudir celui qui traitera ce sujet plus heureusement qu'il ne m'a été permis de le faire moi-même. Jusque-là je dirai :

> ... Si quid novisti rectius istis,
> Candidus imperti, si non, his utere mecum.
>
> (HORACE.)

L'UNITÉ

DES

FORCES PHYSIQUES

LIVRE I

DU CALORIQUE

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS ET LOIS GÉNÉRALES DU CALORIQUE.

Pour les anciens, le *feu* était la cause de la vie : ils le regardaient comme le principe animant l'univers; aussi armèrent-ils du feu la main droite de Jupiter tonnant. Agent subtil, incoercible, capable de tout traverser, de tout détruire et de tout modifier, il a été, avec raison, depuis les temps les plus reculés compté parmi les grandes forces de la nature. Mais le feu est un phénomène assez complexe : il suppose un grand dégagement de chaleur dans un corps, avec production de lumière et altération chimique des substances qui entrent en combustion. Ces effets sont causés par un certain agent ou principe mis en activité.

Pour le connaître, la science moderne, précisant les vagues notions de l'antiquité, a distingué ses diverses manifestations et a reconnu son influence dans certains phéno-

mènes auxquels, à première vue, il ne semble prendre aucune part. Les effets d'élévation de température, de production de lumière, de décomposition dus à l'agent calorifique, ont été soigneusement séparés des phénomènes singuliers, d'un genre analogue, qui accompagnent le feu céleste, c'est-à-dire la foudre, déjà appelée *feu électrique* par les premiers électrisiens. Enfin, on a réussi à montrer clairement son incessante intervention dans l'économie de la nature et à en pénétrer le mystère. Il a fallu d'abord analyser tous les faits, toutes les observations; à présent la science doit suivre une autre méthode, elle doit rapprocher et mettre en parallèle tous les phénomènes partiels ordinairement réunis en un seul phénomène naturel. Mais l'exposé de cette grande synthèse serait inintelligible et sans fondement si elle n'était précédée d'une analyse rigoureuse; par conséquent, en développant le sujet de ce livre, nous commencerons par exposer séparément les divers aspects sous lesquels la science reconnaît l'action de cette cause universelle, et nous ne formulerons pas une définition avant de pouvoir la déduire des faits cités auparavant.

Nous examinerons d'abord l'action et les lois du principe qui produit en nous la sensation du chaud ou de la chaleur, et qui a reçu des physiciens le nom de calorique pour le distinguer de la sensation elle-même[1]. Mais, outre cet effet produit sur l'homme et tous les êtres doués de sensibilité, la présence du calorique se manifeste dans les corps non organisés par un changement de volume et, d'une manière générale, on peut dire que dans toutes les substances une addition de calorique est accompagnée de dilatation, et une soustraction de contraction.

[1] Nous userons cependant indistinctement des mots *chaleur* et *calorique*, bien que le terme chaleur soit par quelques-uns réservé exclusivement à la sensation.

La sensation dont il vient d'être question est un phénomène purement vital d'un genre complétement différent de la dilatation des corps, et bien qu'il se produise d'abord par une telle dilatation, cependant l'une n'a rien de commun avec l'autre; en effet, dans les très-violentes soustractions de calorique faites au corps de l'homme, telles qu'on peut les obtenir par le contact de corps très-froids, on a une sensation de brûlure semblable à celle que l'on éprouve en touchant un corps rouge de feu. A cause de cela nos perceptions tactiles ne pourront jamais nous servir de guide pour mesurer l'intensité du calorique et encore moins pour connaître sa nature.

La mesure de la force calorifique est fondée sur les phénomènes de la dilatation; elle s'effectue à l'aide des *thermomètres*, instruments dans lesquels une dilatation donnée peut être évaluée avec exactitude, et l'intensité de cette force constitue la *température,* nommée aussi *tension calorifique.*

Une longue expérience des propriétés des corps chauds a fourni quelques lois qui, étant indépendantes de toute vue théorique, doivent nous servir de point de départ.

PREMIÈRE LOI. — *Le calorique, dans tous les corps, tend à l'équilibre;* autrement dit, il s'effectue un échange continuel entre les corps chauds mis en contact ou placés à distance, jusqu'à ce que tous soient à la même température ou tension calorifique, c'est-à-dire jusqu'à ce qu'un appareil thermométrique indique pour tous une égale dilatation. Cet échange s'effectue entre corps au contact, en vertu de la propriété nommée conductibilité, et entre corps placés à distance, par le moyen du rayonnement. De là la distinction du calorique statique ou de conductibilité et du calorique rayonnant. Dans ce livre nous étudierons les effets du premier genre, laissant les autres pour un chapitre suivant.

Mais deux corps à la même température renferment, le

plus souvent, des quantités de chaleur bien différentes, d'où une deuxième loi.

Deuxième loi. — *Pour élever des poids égaux de substances diverses à la même température, les quantités de calorique nécessaires ne sont pas égales.* Ainsi, la quantité de calorique, qui échauffe de 1° 1 kilogramme d'eau, échauffe de 9° 1 kilogramme de fer. De telle sorte qu'en mélangeant deux masses égales, l'une d'eau à 10°, et l'autre de fer à 0°, le mélange se trouve à 9°; donc l'eau, s'abaissant d'un seul degré, échauffe le fer de 9°. Les quantités relatives de chaleur nécessaires pour élever le même poids de deux corps à une égale température, sont nommées *chaleurs spécifiques.* Ici il est évident que l'on ne mesure pas les quantités absolues, mais seulement les quantités relatives. Pour cela on est convenu de tout rapporter à l'eau et de prendre comme *unité de mesure la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0° cent. à 1° cent. 1 kilogramme d'eau distillée.* L'unité, ainsi déterminée, est dite *calorie.* Ce procédé rappelle celui employé en mécanique dans l'évaluation des forces ou des masses; on les rapporte toujours à une force ou à une masse unité, de cette façon, pour étudier les phénomènes et en calculer les rapports, il n'est pas nécessaire de savoir en quoi consiste la nature du calorique, disons même que, jusqu'à présent, il nous est impossible de mesurer une quantité de chaleur d'une façon absolue.

Troisième loi. — *L'état physique des corps, état solide, liquide, aériforme ou gazeux, dépend de la quantité du calorique,* et tous les corps peuvent passer par ces trois états si on leur fournit une quantité de chaleur suffisante. La forme gazeuse ou aériforme est considérée comme celle dans laquelle les molécules des corps sont complétement libres et mobiles, et, de plus, douées d'une force expansive indéfinie. Dans les liquides, les molécules sont mobiles sous la plus faible impulsion, mais ils n'ont pas l'expansi-

bilité ; enfin, dans les solides, les molécules sont réunies par les forces dites, à cause de cela, de *cohésion*. Aussi ont-ils une forme propre dépendante des liaisons déterminées par les forces *attractives*. En général, à ces trois états correspondent des volumes différents et une mobilité différente des molécules; celle-ci est maximum dans les gaz et minimum dans les solides. Remarquons en terminant que nous ignorons complétement ce que sont les forces attractives, nous les acceptons comme un fait, et nous les désignons avec un terme convenu. Plus tard, nous nous entendrons sur le véritable sens de cette expression.

QUATRIÈME LOI.—*Dans tout changement d'état d'un corps, une certaine quantité de calorique devient, comme on le dit,* LATENTE, *si le corps passe d'un état physique dans lequel les molécules sont* MOINS *libres à un autre état dans lequel elles le sont* PLUS ; *réciproquement, il se développe du calorique lors du changement inverse.* Cette loi a une importance capitale, et elle est fondée sur les faits les plus certains et les plus vulgaires[1]. Si, par exemple, on mêle 1 kilogramme de glace à 0° avec une égale quantité d'eau à 79°, le mélange se trouve être à 0° lorsque toute la glace est fondue; donc ce corps solide, pour se liquéfier, a absorbé tout le calorique contenu dans l'eau, et il était de 79°; ce calorique, n'ayant produit aucun effet sensible sur le thermomètre, est appelé *latent;* mais évidemment il a produit un autre effet ; il a détruit les liens qui tenaient réunies les molécules de l'eau solide, et leur a rendu la mobilité propre aux liquides.

De même, aussi, lorsqu'un corps passe de l'état liquide à l'état de gaz, une certaine quantité de chaleur devient *latente*, cette quantité est de 606,5 calories pour l'eau.

[1] Rigoureusement parlant, la capacité de l'eau pour la chaleur n'est pas la même à toutes les températures; elle croît avec ces dernières; et la même chose se présente pour tous les autres corps, mais ici nous faisons abstraction de ces petites différences.

Réciproquement, en condensant la vapeur à l'état liquide, on rendra libres les 606,5 calories absorbées dans le phénomène inverse, de même dans la solidification de l'eau les 79 calories absorbées par la fusion de la glace se dégagent. Donc, en réalité, la quantité absolue de calorique n'est pas égale dans un corps sous ses divers états, la température étant toujours la même; cette chaleur peut donc recevoir le nom de chaleur latente. Les dénominations précédentes, et beaucoup d'autres, furent suggérées par certaines idées théoriques très-anciennement acceptées sur la nature du calorique; nous en verrons la véritable signification physique, pour le moment, nous les accepterons comme termes de convention renfermant l'énoncé des faits.

Cependant, pour s'affranchir de ces vieilles idées, les modernes commencent à employer les expressions de *calories de température*, de *fusion*, d'*évaporation*, de *dilatation*.

Cinquième loi. — La dilatation des corps varie suivant la nature de la substance et de leur état physique. Pour les gaz on peut admettre comme approximative cette loi, que *les dilatations sont proportionnelles aux températures, et que les densités varient en raison directe des pressions*. La première partie de cette loi établie par Gay-Lussac (aussi en porte-t-elle le nom), était regardée comme vraie pour tous les gaz et les vapeurs; mais il a été démontré par M. Regnault qu'elle est d'autant plus éloignée de la vérité que le corps aériforme est plus voisin de son point de liquéfaction. Pareille observation s'applique à la deuxième partie de l'énoncé précédent, connue sous le nom de loi de Boyle ou de Mariotte. Elle n'est vraie que pour les gaz dits *parfaits*, c'est-à-dire très-éloignés de leur point de liquéfaction. Ces lois sont des lois *limites* auxquelles satisfont les substances, à la condition d'être soustraites à toutes les influences perturbatrices des forces nommées moléculaires qui exercent

toute leur action quand le corps approche d'un changement d'état. De même pour les astres, le mouvement elliptique est une loi limite convenant au cas d'un corps central unique et d'un astre unique circulant autour de lui; mais comme il existe plusieurs planètes, ce mouvement n'a lieu qu'approximativement. La force expansive que les corps, et spécialement les gaz, reçoivent du calorique, est celle qui est utilisée comme puissance motrice dans toutes les *machines à feu*, et c'est en vertu de cette force expansive que la machine fait un travail, comme nous le verrons mieux dans la suite.

Le calorique est dit un *impondérable*, car les corps, pour être chauds, n'en sont pas plus lourds que lorsqu'ils sont très-froids; on en admet l'existence dans tous les corps, parce que, quelque refroidis qu'ils soient, on peut toujours les supposer soumis à un refroidissement encore plus grand. Nous citerons les autres lois à mesure que le besoin s'en fera sentir. Examinons actuellement quelle est la nature du calorique.

CHAPITRE II

APERÇU HISTORIQUE ET EXPOSÉ DE LA THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

Le calorique a été considéré jusqu'à ces dernières années, même par les plus célèbres physiciens, comme une substance *sui generis*, non soumise à la gravité, qui, en s'interposant entre les pores des substances, en augmente le volume. Cette théorie expliquait un grand nombre des faits les plus importants alors connus, tels que l'invariabilité des chaleurs spécifiques, et de celles d'évaporation. On admettait, en effet, que le calorique pouvait se loger dans les pores des substances de façon à ne pas être sensible au

thermomètre, et que les divers corps avaient une capacité calorifique différente. Cette théorie permit aux expérimentateurs et aux géomètres de soumettre les phénomènes à l'observation et au calcul; aussi fut-elle acceptée par des savants illustres, comme Laplace, Lavoisier, Carnot, Gay-Lussac, etc.

D'autres physiciens, à leur tour, étudièrent l'intime relation existant entre le mouvement et la chaleur, relation telle que toute variation thermique se traduit par une variation de volume laquelle ne peut se faire sans un mouvement, et que, réciproquement, tout mouvement engendre constamment de la chaleur. Ils conclurent de leurs recherches que le calorique est un mouvement se produisant dans l'intérieur des corps, en vertu duquel les distances intermoléculaires varient lorsque ces molécules entrent en collision sous l'influence des agents extérieurs, mécaniques ou chimiques. Newton dit sans hésitation: la chaleur est un mouvement vibratoire dans les corps[1]. Rumford et Montgolfier développèrent cette théorie : le premier en s'appuyant sur les phénomènes les plus ordinaires du frottement; le second, en raisonnant sur la conservation de la force vive dans les chocs. Montgolfier fut conduit à méditer sur ce sujet par certaines considérations tirées de l'étude d'une machine de son invention nommée bélier hydraulique; mais il s'arrêta peu à ces idées, et cet homme remarquable est connu bien plutôt par la découverte des aérostats en papier que par des recherches sur la thermo-dynamique.

Par les progrès de l'optique, et spécialement à la suite des travaux de Fresnel, la généralité des savants fut entraînée à accepter le système des ondes pour expliquer les phénomènes lumineux; on admit que la lumière con-

[1] *Questions d'optique*, t. V, p. 294 de l'édition de Londres, 1706.— « Annon... agit lumen in corpora ad ea cal[illegible]cienda scilicet motumque vibrantem in quo calor consistit in [illegible]xcitandum? »

sistait en un mouvement vibratoire, ayant quelques analogies avec le mouvement sonore. Le son engendré ordinairement par la vibration des solides se propage par l'intermédiaire de l'air et des autres fluides. Semblablement, la lumière et toutes les vibrations calorifiques ou chimiques composant les rayons émanés des corps incandescents auraient leur origine dans les mouvements oscillatoires des corps lumineux, et pour se propager ils nécessiteraient l'intermédiaire d'un fluide. Ce fluide fut nommé éther et on admit qu'il était répandu dans tout l'univers.

Les belles découvertes de Melloni sur le calorique rayonnant ont affirmé les analogies de ce mode de chaleur avec la lumière. Aussi Melloni, qui, entraîné tout d'abord par les idées de son époque, avait cherché à établir la distinction entre ces deux agents, arriva peu à peu à professer hautement que les *rayonnements* calorifiques et lumineux *étaient de simples mouvements*. Cette théorie fut acceptée avec enthousiasme par Fresnel et par Ampère; elle se répandit à grand'peine parmi nous, malgré les efforts du P. Pianciani, et plusieurs théories de ce physicien distingué, regardées alors comme trop avancées, ont été complétement vérifiées par les découvertes ultérieures [1].

Mais les notions exactes sur l'action mécanique de la chaleur dans l'intérieur des corps manquaient, et les défenseurs des nouvelles doctrines ne purent expliquer nettement ce en quoi consistaient la *température*, *la capacité des corps pour la chaleur*, et les phénomènes dits de *chaleur latente*. De plus, les savants livrés aux recherches d'optique et ceux adonnés à l'étude du calorique statique, formaient, pour ainsi dire, deux camps opposés. On n'avait pas encore cherché quels rapports relient ces deux branches de la physique, il était donc impossible de présenter

[1] Voy. les *Institutions physico-chimiques* de G. B. Pianciani. Rome, 1835, vol. IV, appendice théorique.

une théorie homogène. On oscillait sans cesse des idées anciennes aux nouvelles et la langue scientifique se chargeait d'expressions mal définies ou détournées de leur véritable sens physique.

Seuls les mécaniciens théoriciens commencèrent tardivement à s'occuper de la chaleur comme puissance motrice. En 1824, Sadi Carnot donna une célèbre théorie de la machine à vapeur qui fut le point de départ et le sujet de nouvelles recherches. Il partait de ce principe que le calorique est une substance qui se conservant sans altération dans son passage à travers la machine, produit néanmoins le mouvement durant ce trajet. Évidemment d'après cette hypothèse la chaleur devait se trouver en égale quantité aux deux extrémités d'une machine à feu, mais on ne pensa point à vérifier expérimentalement ce résultat théorique dont l'inexactitude a été plus tard parfaitement établie. Carnot fut suivi par Clapeyron [1] qui exposa les principes et trouva les formules analytiques nécessaires pour estimer le travail effectué par le calorique. Tous les savants acceptèrent comme axiome fondamental l'impossibilité de créer soit la force motrice, soit le calorique, par conséquent c'était au moment où un corps chaud devenait froid que la chaleur produisait la force mécanique.

Jusque-là les physiciens n'avaient aucune notion sur le véritable moyen par lequel la chaleur produisait le mouvement mécanique, et bien que Mayer, médecin allemand, en 1842, envisageant le calorique comme un mouvement, eût exposé des idées justes sur l'équivalence de la chaleur et des forces mécaniques, on ne commença cependant à se représenter d'une manière exacte l'action dynamique de la chaleur qu'après les belles expériences de Joule faites pour déterminer avec précision *suivant quel rapport*

[1] *Journal de l'École polytechnique*, t. XIV, p. 159, ch. XXIII, 1834.

le mouvement mécanique se transforme en chaleur. Il commença ses recherches en 1844. Il faisait mouvoir dans l'eau une roue animée par la chute d'un poids; la température atteinte par l'eau lui permettait d'estimer le calorique dégagé, et la hauteur de laquelle tombait le poids donnait le moyen d'évaluer le travail mécanique effectué; calculant le rapport entre ces deux quantités il le nomma *équivalent mécanique de la chaleur*. Cette expérience ne différait pas quant au fond d'une autre faite par Rumford longtemps auparavant, mais elle eut l'avantage de fixer l'attention des physiciens. La question ainsi présentée fut rapidement étudiée sous toutes les formes possibles, et il en résulta une théorie complète des machines les plus employées.

Plusieurs savants, entraînés par ces résultats remarquables, poussèrent à une exagération regrettable les hypothèses sur la nature de ce mouvement moléculaire. On attaqua violemment les idées de Fresnel sur l'éther et on se refusa à admettre l'existence d'un milieu impondérable. On jugea la conception de la matière pondérable suffisante pour expliquer tous les phénomènes, même la propagation de la lumière. Ainsi on retombait dans la théorie de l'émission; on n'accepta aucun principe impondérable et on confondit les notions de *matérialité* et de *pondérabilité*. Nous parlerons en lieu convenable de ce système, résultat direct de la théorie mécanique de la chaleur.

Une école, du reste, assez nombreuse et fort respectable, considère le calorique non comme une substance, mais comme une *force*, c'est-à-dire comme un principe *sui generis* (exemple: la gravité) duquel dériveraient tous les phénomènes calorifiques. Cette école considère les phénomènes calorifiques comme des échanges de travail s'effectuant entre les corps, et l'équivalent mécanique de la chaleur est accepté comme un fait. On doit applaudir aux efforts de cette école en tant qu'elle applique aux phéno-

mènes de la chaleur la méthode qui fut suivie par les géomètres dans l'étude des phénomènes célestes, car elle en recherche les lois sans analyser la nature du principe initial. Mais si cela suffit à la géométrie et à la science appliquée ; il n'en est pas de même pour la physique. En effet, non-seulement le physicien cherche à se faire une idée claire des faits et des lois d'après lesquels une force agit, mais il s'efforce encore de connaître quelle est la nature de cette force. Pour lui la gravité elle-même fournit un ample sujet à la spéculation car nous ne savons rien de son origine et cependant ses lois nous sont parfaitement connues.

Donc, pour suivre les principes de la vraie philosophie, dont Huygens disait[1] : « Toutes les causes des phénomènes naturels doivent se concevoir comme des actions mécaniques, si toutefois nous ne voulons pas désespérer de comprendre quelque chose à la philosophie naturelle. » Nous devons chercher « s'il serait possible de ramener les phénomènes du calorique à un simple échange de mouvement entre les corps, sans recourir à un autre principe, à moins que l'insuffisance d'une semblable explication ne soit parfaitement démontrée. »

Mais considérer le calorique comme un mouvement n'empêche pas de le nommer une *vraie force* en employant ce mot pour exprimer la *cause* quelle qu'elle soit d'un *mouvement*. Cette cause, envisagée d'une façon absolue, peut être un pur esprit (comme l'est certainement le plus pur des esprits, c'est-à-dire Dieu créateur, centre de toute force et de tout mouvement), ou bien encore on peut nommer cause de mouvement et regarder comme telle une masse matérielle quelconque animée de vitesse. En effet, quand une masse matérielle a été mise en mouvement, elle devient capable de produire un effet égal à l'effort déployé pour lui

[1] *Tractatus de lumine*. Amsterdam, 1827, p. 2. Omnium effectuum naturalium causæ concipiuntur per rationes mechanicas, nisi velimus omnem spem objicere aliquid in physicis intelligendi.

donner le mouvement qui l'anime. Par suite, elle peut vaincre une résistance extérieure et par là même effectuer un *vrai travail* dans le sens mécanique du mot, c'est-à-dire, *vaincre une résistance le long d'un chemin déterminé et pendant un temps défini, travail* qui se nomme aussi *effet dynamique* de la force et dont la mesure est le demi-produit de la masse par le carré de la vitesse, c'est-à-dire la *force vive* comme on le démontre par le calcul. Je citerai à ce propos un fragment des écrits de Poncelet [1]. « Un corps mis en mouvement, un certain effet dy-« namique (force vive), peut, à son tour, devenir une cause « ou source de travail... L'inertie, quand elle a été vain-« cue, devient capable de restituer la quantité de travail « dépensée de même qu'un ressort qui a été bandé. En un « mot, l'inertie comme le ressort, sert à emmagasiner le « travail mécanique en le transformant en force vive, de « sorte que la force est un véritable travail disponible. » Et ailleurs [2] : « L'inertie sert à emmagasiner le travail des « moteurs en le convertissant en force vive et à le resti-« tuer intégralement ensuite lorsque cette force vive vient « à être détruite contre ces résistances. »

Ainsi travail et effet dynamique, force vive et masse animée d'une certaine vitesse sont des expressions de même valeur. En mathématique, le mot force vive est employé pour représenter l'effet total de tous les chocs plus ou moins prolongés imprimés à un corps pendant un certain temps.

D'où il résulte la possibilité de convertir numériquement l'effet d'une force en celui d'une autre, par le moyen de la quantité de travail mécanique propre à chacune d'elles ; d'où il résulte encore le moyen de convertir un travail en un autre ou, pour parler plus simplement, un mouvement en un autre équivalent.

[1] Poncelet, *Mécanique industrielle*, part. I, n° 124.

[2] P. 86, n° 138.

Par exemple, un mouvement de translation se convertit en mouvement rotatoire ou en mouvement vibratoire, et le travail d'un homme qui met une cloche en branle se transforme en mouvement vibratoire de l'air, lequel produit le son.

Ainsi donc nous nommerons le mouvement une force, sans craindre de tomber dans un abus de mots en confondant la cause avec l'effet, car les notions de force et de mouvement ne se différencient pas par la diversité de nature, mais par la diversité des rapports. Une masse qui a absorbé un certain travail pour se mettre en mouvement, peut devenir, à son tour, puissance et exécuter un travail. Nous ne nous arrêterons pas à ces subtilités et nous nous conformerons aux habitudes des physiciens et à leur langage. Pour nous (abstraction faite, bien entendu, des cas où l'on admet l'intervention des esprits, ce terme ayant ici le sens expliqué plus haut), il est absurde d'admettre que le mouvement dans la matière brute puisse avoir d'autre origine que le mouvement lui-même. Nous rejetons ces principes appelés *forces*, qui ne sont ni esprit ni matière, ces principes dont on n'a jamais prouvé l'existence et que nous regardons comme de pures abstractions. Nous chercherons donc à réduire tous les phénomènes à de simples échanges ou communications de mouvement, et nous admettrons cet échange comme un fait primordial dont on trouve la raison dans la nature même de la matière[1].

Donc, assimiler le calorique à un mouvement n'empêche pas de le regarder comme une véritable force et d'en calculer les effets. La chaleur produit divers genres de mouvements; d'un autre côté, les mouvements ordinaires de la matière pesante peuvent se transformer en chaleur et ré-

[1] Ces réflexions paraîtront peut-être superflues, mais elles étaient nécessaires dans la première édiiton de ce livre pour éviter de nombreuses objections qui n'ont plus de raison d'être.

ciproquement ; il nous faut donc traiter ce sujet avec quelque développement, et définir les résistances que le calorique doit surmonter dans les corps, c'est-à-dire les différents genres de travail qu'il accomplit. Nous désirons rendre nos explications aussi claires que possible, on nous permettra donc de rappeler ici quelques notions de mécanique indispensables pour l'intelligence de ce qui va suivre.

En mécanique pratique, on mesure le travail d'une force par le produit du poids élevé, dans une unité de temps déterminée, à une certaine hauteur, par cette hauteur. L'unité de poids adoptée est le kilogramme ; les hauteurs sont mesurées en mètres ; les temps, en seconde ; et l'on nomme kilogrammètre le travail nécessaire pour le poids de 1 kilogramme élevé à 1 mètre de hauteur en une seconde de temps. Lorsqu'on évalue l'effet des machines, on emploie souvent unité nommée *cheval-vapeur*, qui est le travail nécessaire pour produire 75 kilogrammes en 1 seconde. Une machine d'un cheval pourrait donc en 1 seconde élever 1 kilogramme à la hauteur d'un mètre, ou bien 75 kilogrammes à 1 mètre de hauteur, car dans les deux cas le travail est le même : $1 \times 75 = 75 \times 1$.

En second lieu, si on nomme *force vive* le produit de la masse m par le carré de la vitesse v, soit mv^2, le travail sera mesuré par la moitié de cette force vive, soit $\frac{1}{2}mv^2$. Dans le cas des corps pesants, il est facile de passer de cette seconde définition à celle donnée précédemment. Soient g l'intensité de la pesanteur, a la hauteur de laquelle tombe un corps, on a $V^2 = 2ga$. Par suite, le travail exprimé d'après la formule sera mga ; et, comme le poids P est toujours égal à mg, le travail à effectuer pour élever un poids est exprimé très-simplement par Pa, c'est-à-dire par le produit du poids, par la hauteur à laquelle il est élevé. Dans les mouvements vibratoires, les vitesses étant alter-

nativement de signe contraire, il y a avantage à recourir aux forces vives pour exprimer le travail, car le produit est indépendant du signe, puisqu'il renferme le carré de la vitesse comme facteur.

CHAPITRE III

TRANSFORMATION DU MOUVEMENT EN CHALEUR.

Un ancien axiome dit : *Le mouvement est cause de chaleur.* Nous avons chaque jour l'occasion de vérifier l'exactitude de cette assertion en observant les phénomènes de frottement et le choc des corps. Mais personne avant Joule n'avait cherché dans quel rapport le mouvement, considéré sous sa forme ordinaire, correspondait à la chaleur développée; autrement dit, personne n'avait calculé le nombre de *kilogrammètres de travail correspondant à une calorie*, c'est-à-dire à combien de *force* mesurable par la hauteur à laquelle on devait élever un certain nombre de kilogrammes correspondait la force qui, engendrée par des actions mécaniques, peut élever dans le même temps de 0° à 1° centigrade une masse d'eau de 1 kilogramme. Joule détermina expérimentalement ce rapport au moyen de la machine dont nous avons dit un mot plus haut dans laquelle une roue immergée dans une masse d'eau est mise en mouvement par la chute d'un poids. Contrairement à l'opinion admise, il trouva que les liquides s'échauffent par le frottement, et malgré la faible quantité de chaleur dégagée, grâce à la sensibilité de ses instruments, il démontra que, pour produire une calorie, il fallait dépenser 428 kilogrammètres [1].

[1] Indépendamment des recherches de Joule, M. Bianconi, en Italie, avait constaté l'échauffement des liquides par le mouvement. Les marins savent parfaitement qu'après une tempête la mer est plus *chaude*.

Cette force est énorme et équivaut à six chevaux-vapeur. Ainsi une machine qui aurait en chevaux-vapeur la force indiquée, en employant toute son action à échauffer 1 kilogramme d'eau, élèverait la température de cette masse d'un seul degré par chaque seconde de temps; et, d'une manière générale la force qui transporterait 428 kilogrammes d'eau à 1 mètre de hauteur dans un temps quelconque, si elle était employée à élever la température de la masse d'eau elle-même ne produirait qu'une variation thermométrique de 1° centigrade dans le même temps. On construisit dans la suite d'après ces principes quelques machines dans lesquelles, utilisant la chute de l'eau, on réduisait ce liquide en vapeur par la force mécanique développée avec ces machines. Mais on reconnut généralement que, en raison de la valeur considérable de l'équivalent mécanique de la chaleur, ces machines étaient pratiquement inutiles et qu'il vaut mieux employer leur force à comprimer l'air, puis utiliser cet air comprimé comme moteur au lieu de la vapeur obtenue par le moyen précédent.

Dans l'opinion des premiers physiciens, il fallait un frottement très-considérable et un état rugueux très-marqué des surfaces frottantes pour qu'il y eût dégagement de chaleur par action mécanique. Si, en effet, les aspérités augmentent dans les machines ordinaires la dépense de la force motrice pour produire des frottements au lieu d'un effet utile, en développant une plus grande quantité de chaleur dans les parties qui manquent de substances lubrifiantes; cependant ces aspérités ne sont pas nécessaires et une machine développe de la chaleur malgré les corps gras employés pour en éviter la prompte détérioration. Ainsi M. Joule et, plus tard, Foucault, ont fait voir que la force mécanique peut se convertir en chaleur par le moyen d'une résistance exercée sans contact d'aucun genre : à l'aide de la manivelle M, on fait tour-

ner (fig. 1) un disque de cuivre D entre les deux pôles A et B d'un puissant électro-aimant très-rapprochés de la surface du disque. Le disque s'échauffe à un point tel qu'il devient impossible d'appliquer la main à sa surface, mais en même

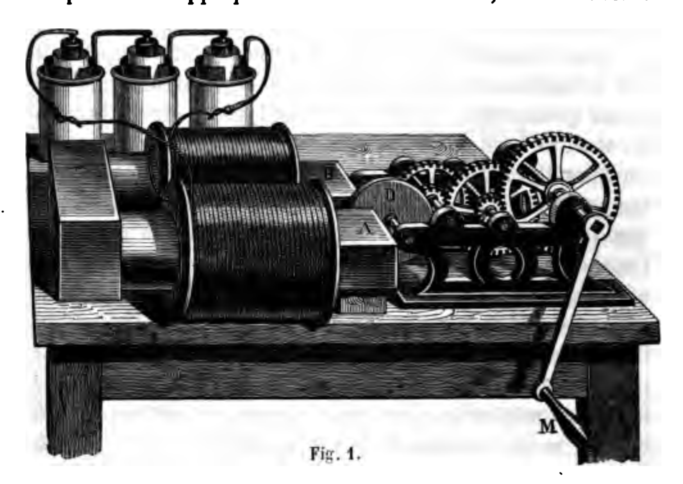


Fig. 1.

temps il faut déployer une énorme force mécanique pour le mettre en mouvement. Et cette force évaluée en kilogrammètres reproduit le nombre indiqué plus haut comme représentant l'équivalent mécanique de la chaleur.

Toutes les fois qu'un corps en mouvement vient à choquer un autre corps, il se produit de la chaleur, et tout le monde sait que sous les marteaux des forgerons le fer reste incandescent plus longtemps que s'il était abandonné à l'air libre. Les plaques des navires blindés, frappées par les boulets lancés à l'aide des énormes canons modernes, deviennent rouges de feu. Toute masse d'eau qui tombe dégage de la chaleur, et voilà pourquoi les eaux en mouvement gèlent moins facilement que si elles sont stagnantes. On croit communément que dans ces diverses

circonstances le mouvement est détruit, tandis qu'il est réellement transformé en une quantité de chaleur équivalente. Les moteurs hydrauliques fournissent le moyen de faire toucher du doigt, pour ainsi dire, cette production de la



Fig. 2.

chaleur par la pesanteur. On fixe le frein de Prony sur l'axe d'un de ces moteurs[1], lorsque la tenaille est libre, le levier avec le poids reste vertical et glisse sur l'axe ; mais si on exerce une pression à l'aide des boulons, le levier est soulevé et se tient horizontal malgré l'action de son propre poids et de celui qui lui est fixé. Ainsi l'effet produit par la chute de l'eau est tout entier employé à soutenir un poids proportionnel à la masse d'eau qui tombe ; or, pendant que ce travail s'accomplit sur l'axe, les mâchoires du frein sont fortement échauffées et prendraient feu promptement si on ne les maintenait pas mouillées d'eau froide. M. Joule ayant imaginé une disposition qui lui permettait de calculer dans cette expérience la quantité de chaleur en laquelle se convertissait la force mécanique, trouva une valeur très-sensiblement égale à celle indiquée plus haut.

[1] Ce frein consiste (fig. 2) en un levier LL' muni d'un coussinet *c* attaché sur l'axe du moteur A au moyen d'une chaîne *dd*, formée de pièces

Il était de la plus haute importance de déterminer l'équivalent mécanique de la chaleur par des procédés dissemblables afin de reconnaître s'il conservait une valeur constante. M. Hirn a mis à profit le choc ordinaire des corps en faisant en grand un appareil ressemblant au pendule balistique employé dans les expériences sur le choc des corps. Les poids étaient : 1° une masse de bois pesante, suspendue horizontalement à des cordes verticales et nommée *bélier ;* 2° une masse de pierre suspendue aussi de la même manière et nommée *enclume*. Les deux poids étaient garnis d'armures en fer à leurs extrémités, et on plaçait entre eux une masse de plomb présentant une cavité dans laquelle on introduisait un thermomètre pour examiner la température avant et après le choc. Cet appareil permettait de calculer avec une suffisante exactitude la force vive de la chute et du rebondissement des deux poids, puis d'évaluer celle qui dans le choc s'était perdue, c'est-à-dire transformée en chaleur. Après plusieurs expériences de ce genre, on trouva pour l'équivalent mécanique de la chaleur le nombre 425 kilogrammètres.

D'autres expériences sur la condensation des gaz, sur

de tôle articulées les unes dans les autres et garnies en dedans de plaques de bois qui s'appliquent sur la partie inférieure de l'arbre; cette chaîne est fixée au levier par des boulons et des écrous, de façon à former une espèce de tenaille qui peut enserrer l'axe du moteur; au levier est attaché un plateau P chargé de poids.

Les praticiens ont établi ainsi la théorie du frein de Prony. Lorsque le levier est en équilibre, il y a égalité des moments, c'est-à-dire des produits du levier l par son poids p et du frottement f par le rayon r de l'arbre. Ainsi $pl=fr$; d'où $2\pi pl=2\pi fr$. Le second membre exprime le travail de la machine (résistance $f\times$ par le chemin parcouru $2\pi r$). Par conséquent, le premier exprime aussi la puissance de la machine. Mais ce travail de frottement dégage précisément la quantité de chaleur qui correspond à l'équivalent calorifique de la puissance; par conséquent, le nombre de calories produites sera égal au produit du nombre de kilogrammètres $2\pi pl$ par l'équivalent calorifique de 1 kilogrammètre $\frac{1}{425}$. On aura ainsi $\frac{2\pi pl}{425}$.

l'étirement du fer, sur le frottement de la fonte [1], etc., ont fourni une valeur de 432 kilogrammètres, et Zeuner, discutant tous ces résultats, adopta pour valeur finale A=425 kilogrammètres = travail équivalent à une calorie. Donc, pour convertir en kilogrammètres un nombre n de calories, C ou réciproquement, on aura cette relation

$$nC = n\ 425^{km}$$

et l'équivalent calorifique du travail d'un kilogrammètre sera $\frac{C}{425}$, d'où $n \times 1^{km} = \frac{nC}{425}$.

En terminant, nous dirons que si le mouvement sensible de translation que possédaient les deux corps agissant mécaniquement disparaît, il y a nécessairement production d'un mouvement moléculaire invisible, à la vérité, mais néanmoins parfaitement réel. Ce mouvement consiste en oscillations moléculaires très-petites qui constituent le calorique et déterminent en nous la sensation du chaud.

CHAPITRE IV

CONVERSION DE LA CHALEUR EN MOUVEMENT.

La conversion du mouvement en chaleur ou, pour parler d'une manière plus générale, la production de la chaleur par le mouvement lorsque ce dernier cesse de se manifester sous sa forme ordinaire, est une notion avec laquelle notre esprit se familiarise sans difficultés, mais

[1] Voyez dans Hirn, ouvrage cité, une longue liste des nombres obtenus. Les expériences faites sur l'eau soumise à de fortes pressions ont donné 433 kilogrammètres; le choc des corps, 425. L'expansion des gaz a fourni pour limite inférieure 423 et pour limite supérieure 441,6. La vitesse du son permet aussi de calculer l'équivalent dynamique de la chaleur.

nous ne concevons pas aussi facilement la réciproque, c'est-à-dire une absorption de chaleur corrélative de toute production de mouvement. D'après l'ancienne théorie, la chaleur étant une substance, elle ne peut disparaître; il est donc très-important d'établir la réalité du fait par des expériences précises, et la solution de ce problème présente des difficultés de plus d'un genre.

Supposons une machine à vapeur arrivée à un régime uniforme, dans laquelle, par des moyens appropriés on puisse déterminer la température de la vapeur à son entrée dans le cylindre et à sa sortie dudit cylindre; la connaissance de cette température suffira pour évaluer la quantité de chaleur contenue dans le gaz, et par suite les pertes qu'il a éprouvées en traversant la machine, sans qu'il soit nécessaire de savoir ni sa pression ni son volume. Si le calorique reste en quantité constante, et s'il n'y a aucune absorption de chaleur pendant la production du travail, la vapeur, après avoir servi à mouvoir le piston, pourra en se rendant dans des tubes et des récipients convenablement disposés être employée à échauffer d'autres corps, de même que l'aurait fait la vapeur arrivant directement de la chaudière. En d'autres termes, on retirerait de la vapeur d'abord tout son effet utile comme agent thermique, et de plus le travail mécanique qui serait par suite obtenu sans dépense de combustible. Ainsi on aurait le travail *gratis*.

Or, rien n'empêcherait que cette vapeur chaude, après avoir traversé un premier cylindre, s'introduisît dans celui d'un second moteur, de sorte que l'on obtiendrait du mouvement indéfiniment; en outre, supposant évitées les pertes dues au rayonnement, le mouvement perpétuel deviendrait réalisable; car le second moteur pourrait produire par le frottement la quantité de chaleur perdue par rayonnement dans les deux appareils, compenser ainsi les pertes accidentelles, et de plus, restituer autant

de force que les frottements en absorbent. Chacun voit à présent l'absurdité de notre hypothèse. Après avoir résolu la question théoriquement, examinons-la expérimentalement et cherchons si la vapeur présente la même température à l'entrée et à la sortie du cylindre.

Séguin d'abord, ensuite Hirn et Regnault démontrèrent que réellement il y a une perte de chaleur dans les circonstances précitées. Hirn, avec une machine à vapeur d'une force de 150 chevaux dans laquelle le travail restait uniforme, alors que les quantités de vapeur variaient de $0^k,345$ à $0^k,469$ par seconde, trouva une perte de 38 calories, abstraction faite des différences observées dans les diverses expériences qui furent très-légères malgré les variations assez étendues de la quantité de vapeur qui traversait la machine dans des temps égaux. Dans une autre série de recherches, avec un moteur de 116 chevaux, il trouva une différence en moins de 29 calories. Enfin, avec une machine de 90 chevaux, la diminution fut trouvée de 20 à 21 calories, les quantités de vapeur variant de $0^k,190$ à $0^k,229$[1].

Regnault a repris et varié ces expériences. Dans une machine à vapeur fonctionnant à 5 atmosphères, sur 653 calories entrant dans le cylindre, il trouva qu'il s'en perdait 16, c'est-à-dire $\frac{1}{40}$; dans un autre, 34, ou d'une manière générale $\frac{1}{20}$ de la quantité totale[2].

Ainsi le fait d'une perte de chaleur produite par le travail, ou effet mécanique d'une machine, est chose irrécusable. Il est difficile à la vérité de déduire de ces expériences le nombre représentant l'équivalent mécanique de la chaleur, mais la cause en est à la difficulté d'évaluer la *totalité* du travail mécanique fait par l'appareil. Si on se préoccupe de déterminer seulement

[1] Hirn, op. cit. p. 93.

[2] Regnault, *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. XXXVI, p. 676.

une fraction de ce nombre et de conserver à cette fraction une valeur constante, on reconnaît *qu'elle est indépendante de la quantité de vapeur en circulation et seulement variable avec le travail produit.* La machine à vapeur utilise donc seulement une partie assez faible de la chaleur communiquée, mais la partie absorbée par le travail est suffisamment grande pour que l'on ne puisse l'attribuer ni aux simples pertes par rayonnement, ni aux erreurs inévitables dans de semblables expériences. La série des phénomènes produits par l'eau au sein d'un moteur à vapeur rend cet appareil très-propre à établir le rapport fixe existant entre les équivalents calorifique et mécanique. En effet, l'eau sous la forme liquide entre dans la chaudière, là elle se réduit en vapeur emportant avec elle une certaine quantité de chaleur, elle entre dans le cylindre et y perd une partie de ce calorique pour produire du travail mécanique, puis elle va au condensateur dans lequel, perdant le reste de sa chaleur, elle revient de vapeur eau liquide, enfin cette eau reprise par une pompe est ramenée à la chaudière. Le cycle des transformations n'altère pas la nature du fluide, ni ses propriétés chimiques, et étant donnée simplement la différence des tensions que possède la vapeur dans les diverses parties de son trajet, on peut évaluer la variation de température due à l'effet mécanique produit dans l'intérieur de la machine.

Les animaux sont de véritables machines à feu, par conséquent, sous certains rapports, ils doivent être soumis aux mêmes lois. Les expériences faites par Hirn sur lui-même et sur les autres montrent que, dans tous les cas où il se produit un travail dynamique, la respiration s'active davantage, et il se consomme une plus grande quantité d'oxygène; par suite la chaleur est dégagée en plus grande abondance. Cependant en mesurant la quantité de chaleur effectivement contenue dans le corps humain, on la trouve

notablement moindre que celle produite par la combustion devenue plus intense. Hirn, dans une expérience, a constaté une différence en moins de 436 calories, 330 dans une autre, et, calculant d'après les résultats de la première le travail effectif de la seconde, il trouva un accord parfait entre le calcul et l'observation[1]. Réciproquement, si un homme descend une échelle, la quantité de chaleur renfermée dans son corps augmente, car au travail organique s'ajoute celui de la pesanteur.

La machine à air chaud d'Ericsson démontre encore, par son mode de fonctionnement, la perte de chaleur accompagnant la production du travail mécanique. Cette relation est aujourd'hui la base de toutes les théories des moteurs animés par le feu.

Les corps gazeux, en vertu de leur énorme dilatabilité, se prêtent mieux que tous les autres au genre d'étude qui nous occupe en ce moment; mais, sur les solides eux-mêmes, on peut vérifier la loi de l'absorption de la chaleur par le travail mécanique. Exemple : à l'extrémité d'une verge métallique on attache un poids suffisant pour déterminer l'allongement du métal; ce dernier s'échauffe à cause du travail exécuté par le poids qu'il supporte. On laisse à la chaleur produite le temps de se dissiper; puis on enlève une partie de la charge; le poids restant est soulevé par l'élasticité du fil; et à ce moment il se manifeste dans le métal un abaissement de température. Or, si la seconde partie de l'expérience avait été faite avant que le fil ait perdu sa chaleur, évidemment la température de la masse n'aurait présenté aucune variation apparente, car la chaleur dégagée par le premier travail positif est égale à celle absorbée par le second travail négatif.

Carnot admettait comme principe fondamental que

[1] Hirn, op. cit. p. 83, *Théorie mécanique de la chaleur*, t. I, p. 29 et 30.

« toutes les fois qu'il y a transport d'une certaine quantité de chaleur d'un corps chaud à un corps froid, il se produit une quantité de travail équivalente, pourvu qu'il ne survienne aucun changement définitif dans l'état du corps servant d'intermédiaire ; *et la quantité de chaleur en action reste constante.* » Mais autant la première partie de cette proposition est vraie, autant la seconde est fausse, car réellement *il disparaît une quantité de chaleur proportionnelle au travail accompli*, principe dont l'intelligence sera plus complète alors que nous aurons examiné à fond la parfaite correspondance des deux ordres de phénomènes.

CHAPITRE V

CONSÉQUENCES DES FAITS PRÉCÉDENTS. — INVARIABILITÉ DE L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

Les faits exposés jusqu'à présent démontrent que le mouvement détruit et le calorique dégagé ont entre eux la liaison intime de la cause à l'effet, et qu'il existe un rapport unique et constant entre les quantités positives ou négatives de travail et les quantités de chaleur reçues ou perdues. Demandons-nous maintenant si cette liaison est telle que le mouvement disparu, en tant que mouvement de translation, puisse être regardé comme devenant mouvement vibratoire calorifique. Se produit-il alors une véritable transformation dont peut donner idée l'échange de mouvement s'établissant entre masses lors de leur choc réciproque ? Dans ce dernier cas, on considère le mouvement de l'une comme se transformant en mouvement de l'autre. Ainsi, le choc d'un marteau sur une cloche se transforme en mouvement vibratoire de la cloche et de l'air ambiant. Pour répondre à cette délicate question, les expériences citées plus haut peuvent être regar-

dées comme insuffisantes par les philosophes rigoureux, car un grand nombre d'entre elles ne sont pas vraiment *réversibles*, et d'autres ne peuvent être exactement calculées; par suite, ce sujet mérite d'être développé.

Premièrement, nous devons distinguer deux espèces de travail pouvant être produit par le calorique : un *travail extérieur* et un *travail intérieur*, ce dernier s'accomplit dans le corps lui-même. Si un gaz enfermé dans un cylindre se dilate et soulève en même temps un piston pesant, il accomplit ces deux genres de travail. L'extérieur est l'élévation du poids, l'intérieur la dilatation, c'est-à-dire l'écartement des molécules du gaz. Sous le nom de travail intérieur, on comprend les changements d'état des corps et leurs dilatations, en un mot le travail à faire pour surmonter les liens de l'attraction moléculaire. Ceci posé, il doit certainement exister une parfaite réciprocité entre le travail produit et le calorique absorbé toutes les fois qu'il ne s'exécute aucun travail extérieur, et alors la transformation de mouvement s'accomplit tout entière dans l'intérieur du système. Ceci est une conséquence nécessaire du principe de la conservation de la force vive. On sait, en effet, que, dans tout mouvement développé au sein d'un système matériel par les seules actions réciproques de ses parties, la somme des forces vives reste invariable. Or, si la chaleur et le travail se convertissent l'un dans l'autre et *vice versa*, tous deux ont la même mesure, soit la moitié de la force vive $\frac{1}{2}mv^2$, par suite dans un système, quels que soient les changements survenus dans les parties et le travail intérieur produit, la température ne doit point changer. L'expérience a mis hors de doute cette conséquence, mais avant de la développer, il faut indiquer certains faits importants qui se présentent dans les variations du volume et de la densité des gaz.

1° Il est démontré par les recherches de Regnault que sous toutes les pressions, un même poids de gaz a sensi-

blement la même capacité pour la chaleur et que l'influence de la pression est très-faible. Cette loi est vraie pour les gaz dits parfaits; pour les vapeurs, qui sont des gaz peu éloignés de leur point de liquéfaction, elle souffre des exceptions, mais alors on peut évaluer la variation de la capacité calorifique. Parmi les gaz parfaits on en peut citer à peine trois, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote, encore doivent-ils être bien purs; sinon, ils sont soumis à des exceptions. Toujours est-il que dans les conditions normales *la capacité calorifique des gaz parfaits est la même à toutes les températures;* on ne peut donc pas, à l'exemple de quelques physiciens, expliquer, par un changement de capacité calorifique, la variation de température observée dans ces gaz au moment où leur volume augmente ou diminue.

Arrêtons-nous un instant sur ce point. Soit un gaz renfermé dans un cylindre, fermé par un piston mobile pouvant glisser sans frottement; on soulève le piston de manière à accroître la capacité du récipient, aussitôt la masse fluide se dilate et sa température diminue. Cet abaissement est dû au travail fait par le gaz pour envoyer ses propres molécules dans le nouvel espace ouvert devant lui. Mais les choses se passeraient tout autrement si le gaz, pour se dilater, devait traverser un étroit canal dans lequel il éprouverait un frottement; alors le gaz s'échaufferait en ce point si bien que dans une des deux expériences on observerait une dilatation suivie d'un refroidissement, et dans l'autre le même phénomène s'accompagnerait d'une élévation de température. Réciproquement un gaz vient-il à être comprimé, la chaleur produite par le travail mécanique de la force employée à la compression devient libre. Tenir compte de tous ces éléments dans les divers cas de la pratique est chose difficile; aussi nos expériences sont-elles toujours entachées d'erreurs, et même, dans certaines circonstances, lors du changement d'état d'un corps par l'effet d'un travail intérieur, les résultats sont tels

que l'on arrive à se demander sérieusement s'il n'y a pas eu destruction de chaleur. Une expérience due à Joule montre que dans le cas de travail extérieur nul, il y a toujours équilibre parfait entre la chaleur dégagée et le travail accompli dans l'intérieur du corps, et que réciproquement ce même travail se convertit en chaleur suivant une proportion rigoureusement équivalente; donc par le travail intérieur, la température du système ne doit nullement changer, en vertu du principe de la conservation des *forces vives*.

Voici l'expérience. M. Joule renferma dans un récipient plein d'eau deux ballons formés d'un métal résistant; les deux ballons pouvaient communiquer ensemble à l'aide d'un robinet. Dans l'un, A, se trouvait de l'air comprimé à 10 atmosphères; l'autre, B, était vide. La température de l'eau était observée avec le plus grand soin. Le robinet étant ouvert, l'air se mit en équilibre de pression dans les deux ballons et la température de l'eau resta stationnaire. Ce fait analysé convenablement conduit à la proposition énoncée plus haut. En effet, en ouvrant le robinet, l'air du récipient A se dilate et se refroidit, comme on peut le voir en mettant seulement le ballon A dans l'eau. Mais si, dans le ballon B, l'air dilaté arrive à une basse température, cet air étant comprimé par celui qui continue à affluer en B, il se dégage alors une certaine quantité de chaleur. A la vérité,



Fig. 3.

la masse d'air donnée éprouve en définitive une dilatation; il semble donc que finalement on devrait observer un refroidissement. Pourquoi donc la température reste-t-elle la même? La raison en est dans le travail mécanique produit pendant le passage du gaz. Les molécules gazeuses sont d'abord lancées du premier dans le second ballon comme des projectiles qui, à l'origine du mouvement, ont une vitesse de 600 mètres par seconde : puis cette vitesse va sans cesse diminuant jusqu'à ce que l'équilibre de pression soit établi. Durant le passage du gaz il se produit un choc des molécules et une vibration qui doivent élever la température de B. L'air du ballon A fournit donc du travail produit aux dépens de sa propre chaleur; ce travail est tel que l'orifice traversé par le gaz s'échauffe considérablement, Joule l'a prouvé par des expériences directes. Cette chaleur dégagée dans B se communique à la masse entière et l'échauffe de telle façon que, malgré le refroidissement qu'elle a éprouvé par le fait de la dilatation, la température ne change pas. Comme il n'y a aucun travail extérieur, la compensation est parfaite dans l'état final du système, et cependant, évidemment, dans les diverses parties, à un moment donné, l'état thermométrique a varié et l'équilibre complet ne s'est établi qu'après un certain temps. M. Cazin, à l'aide d'un ingénieux appareil, a réussi à rendre sensibles les variations de température spéciales à chacune des phases de l'expérience [1].

L'expérience de Joule, répétée par Regnault, a réussi parfaitement; cependant on pouvait objecter que la quantité de chaleur dégagée ou absorbée dans ces conditions était si faible qu'il était difficile de la mesurer; M. Hirn pensa à transformer tout l'appareil en une sorte de thermomètre différentiel, faisant usage d'un tube divisé en

[1] Voyez *Comptes rendus*, 9 mars 1868.

deux compartiments par une membrane; à l'aide d'une pompe, il comprima l'air intérieur dans une des cellules d'une quantité égale à celle dont il le dilatait dans l'autre; puis, la communication étant établie entre les deux espaces par la rupture de la membrane, et aussitôt un manomètre étant mis en relation avec l'appareil, il trouva que la température restait constante et que le manomètre indiquait une tension égale à celle observée avant le partage du gaz. On avait eu le soin d'attendre, avant de commencer l'expérience, que tout le système fût revenu à la température primitive et que la chaleur produite par la manœuvre de la pompe se fût dissipée; l'expérience fut faite d'une manière très-concluante, et les conditions étaient telles qu'on pouvait observer une variation de 0°,02 dans la température pour une différence de ½ atmosphère.

Ces expériences, en faisant voir que la somme des forces vives se conserve constante dans un système malgré le travail intérieur et les variations de température correspondantes, nous semblent démontrer en même temps que la quantité de chaleur, qui disparaît pendant qu'une machine mue par les gaz raréfiés reste en fonction, est transformée en un autre mouvement; ainsi la vitesse de vibration des molécules élémentaires devient vitesse de translation de masses plus ou moins considérables, et réciproquement la vitesse de translation de masses ayant une grandeur sensible peut se transformer en vitesse vibratoire de masses moléculaires et presque infinitésimales [1].

Pour mieux nous convaincre que les choses se passent

[1] Encore faut-il noter que les vibrations supposent une *certaine translation;* de sorte que, réellement, cette distinction n'est pas rigoureuse; nous l'employons dans le sens très-large qu'on lui donne communément lorsqu'on distingue les mouvements en mouvements de vibration et de translation. N'ayant pas d'autres expressions à notre disposition, nous nous servirons de celles-là.

ainsi et que véritablement une partie du mouvement, animant le gaz comme chaleur, se transforme en travail, considérons la question à un point de vue plus simple, mais non moins exact.

Supposons un cylindre imperméable à la chaleur, dans lequel un piston peut se mouvoir sans frottement. Ce piston est chargé d'un poids, la pression atmosphérique par exemple. Si, pour fixer les idées, nous supposons l'aire du piston égale à 1 mètre carré, la pression totale sera 1033 kilogrammes. Supposons enfin que le volume d'air renfermé dans le cylindre soit 1 mètre cube, et que nous l'échauffions suffisamment pour en doubler le volume, comme les gaz se dilatent de 0,00366 par 1° du thermomètre, il faudra élever la température à 272°,4. Alors le piston se sera élevé de 1 mètre et nous aurons produit un travail extérieur de 10333 kilogrammètres, plus le travail intérieur de la dilatation du gaz. Actuellement, si nous enlevons au gaz autant de chaleur que nous lui en avions donné primitivement, c'est-à-dire 272°,4, il reviendra à sa température première; disposons les choses de telle sorte que le piston descende en suivant le gaz dans sa condensation, sans exercer sur lui aucune compression par l'effet de son poids; puis demandons-nous si, lorsque le volume de la masse gazeuse aura repris sa valeur première, la température et par suite la pression du gaz seront les mêmes après et avant l'expérience? La réponse est facile. Toutes les circonstances se retrouvent-elles les mêmes, on aura obtenu l'élévation d'un poids sans aucune dépense de force, résultat impossible. Donc la température sera moindre; et en divisant tout le travail effectué par l'équivalent mécanique de la châleur et par la capacité calorifique du gaz, on pourrait trouver le nombre de degrés dont la température doit s'abaisser. La température finale est de 205°,99; or 272°,85—205°,99=66°,66. Tel est donc le refroidisse-

ment éprouvé par le gaz pendant l'expérience[1]. On rendait compte autrefois de cette diminution de température par une augmentation de la capacité calorifique, mais l'inexactitude d'une telle explication est aujourd'hui démontrée, la capacité des gaz étant constante. Force est donc d'admettre que la quantité disparue est réellement transformée en travail. Non-seulement l'expérience a établi l'équivalent du travail produit et du calorique absorbé, mais elle a encore fait voir que cette équivalence est indépendante des corps servant d'intermédiaires. Ainsi on avait essayé anciennement l'emploi de la vapeur d'éther sulfurique dans les machines motrices, et on espérait réaliser ainsi une notable économie de combustible à cause de la grande volatilité de cette substance. La pratique a prouvé qu'il n'en était rien et la théorie permettait de prévoir ce résultat. La force mécanique ne dépend pas en effet de la plus ou moins grande facilité avec laquelle un corps se dilate, mais de la quantité de chaleur transformée, et cette quantité, pour obtenir un effet dynamique donné, doit toujours être la même, autrement on aurait la force créée de rien.

La conception de la transformation de la chaleur en travail mécanique est encore aujourd'hui obscure pour un grand nombre de personnes, qui, par suite, répugnent à l'admettre. Essayons de rendre cette notion parfaitement claire.

Nous évaluons les températures par la dilatation des corps, et même aucun autre moyen n'est à notre disposition ; d'autre part, nous évaluons le travail mécanique en kilogrammètres : entre ces deux quantités, comment établir une relation ? Pour résoudre cette difficulté à l'aide d'un exemple familier, supposons que nous nous proposions d'estimer l'équivalent mécanique des vibrations sonores. La force mécanique du marteau produisant le choc s'esti-

[1] Hirn, p. 17.

mera à la manière ordinaire ; mais comment apprécier celle de la vibration sonore? On pourrait mesurer l'amplitude d'une partie du corps vibrant, par exemple en observant les mouvements d'un rayon lumineux réfléchi par un petit miroir fixé au corps sonore, procédé déjà employé par Lissajous dans ses expériences sur les diapasons. Cette façon d'opérer serait très-exacte, et nous aurions ainsi facilement un coefficient de transformation d'un des mouvements dans l'autre, nous trouverions ainsi qu'un certain nombre de kilogrammètres employés à la percussion correspond à un certain nombre de millimètres dans l'amplitude de la vibration. Le rapport ainsi calculé peut représenter l'équivalent mécanique du son. Certainement il n'y a pas identité ni de mesure ni de nature entre ces deux éléments, et cependant il est hors de doute que l'un est lié à l'autre non-seulement par la relation de la cause à l'effet, mais aussi par le principe de la transformation des mouvements qui trouve ici une de ses applications les plus évidentes[1].

De même les dilatations thermiques produites par les vi-

[1] A l'Exposition de l'industrie à Paris en 1855, il y avait une immense cloche soutenue par un système de supports qui en rendait le mouvement si facile, que, malgré sa masse, un seul homme suffisait pour la maintenir en mouvement, mais sans la faire sonner. L'homme qui montrait la cloche portait aux nues l'ingénieux mécanisme et aurait voulu le voir mis en usage dans tous les clochers, pour épargner la fatigue aux sonneurs. Un ecclésiastique, bon géomètre, qui se trouvait dans la foule, dit qu'il voudrait bien voir la même expérience, mais en faisant sonner la cloche. Tous les assistants ne comprirent pas la différence, et moins encore que tous les autres celui qui faisait l'éloge de la machine. Si l'expérience avait été faite, on aurait trouvé une grande différence : la cloche frappée par le battant pendant sa descente éprouve par cela même une perte de mouvement, une portion de la vitesse acquise dans la chute est détruite par le choc, et dans la seconde moitié de sa course elle ne remonte pas à la hauteur qu'elle atteindrait si elle oscillait à vide, car dans ce dernier cas les seules résistances à vaincre seraient les frottements. La force vive perdue dans le choc est transmise à l'air et transformée en ce mouvement vibratoire qui produit le son, ou, pour parler plus simplement, est *transformée en son*.

brations moléculaires peuvent servir à évaluer la force mécanique qui les produit et réciproquement. En effet la dilatation thermométrique mesure évidemment l'intensité des vibrations moléculaires; et celles-ci sont reliées à la force mécanique, de telle façon que non-seulement le rapport entre ces deux éléments est constant, mais encore la destruction de la vibration entraîne la production de la force; en un mot on peut admettre une véritable transformation. Cette transformation réciproque est aujourd'hui une connaissance vulgaire, et l'on en tire parti pour expliquer un grand nombre de phénomènes naturels : tant il est vrai qu'au point de vue historique, comme au point de vue logique, le problème de la nature du calorique a pris naissance dans la théorie de la chaleur rayonnante et dans les analogies des ondulations lumineuses et calorifiques avec celles du son; privée de cet appui, la seule notion de l'équivalent mécanique n'aurait pas suffi pour donner une idée claire du phénomène que l'on nomme la chaleur des corps. Toutefois cette comparaison établie entre le son et le calorique, considérés tous deux comme des mouvements vibratoires, a été poussée trop loin par quelques physiciens; lorsqu'ils ont envisagé les sons produits par certains corps chauds, dans des circonstances particulières, comme un effet de vibrations calorifiques[1]. On dépasse les limites d'une induction légitime si dans ce cas on admet un effet direct, car les sons dont nous parlons sont tellement graves, qu'ils supposent des vibrations immensément plus lentes que celles animant les molécules dans les vibrations calorifiques. Il faut regarder ces sons comme des effets secondaires résultant soit de la dilatation de l'air

[1] Les expériences de ce genre sont assez simples : une médaille en cuivre chauffée avec une lampe à alcool, puis placée sur une enclume ou une autre masse d'un métal élastique produit un son. On réussit aussi avec des corps d'une autre forme, et l'expérience est aujourd'hui parfaitement connue.

interposé, soit de mouvements inégaux dans les corps mis en contact; l'un d'eux se dilatant pendant que l'autre se contracte, ces alternatives produisent un sautillement et par suite une vibration sonore. Quelle que soit l'explication adoptée, les sons ainsi produits prouvent que les molécules des corps sont dans une grande agitation; à la vérité, ce mouvement moléculaire n'a jamais été mis en doute, pas même par les physiciens qui admettaient le feu pénétrant dans les corps sous forme de corpuscules, et parmi ceux-là je citerai Galilée et Huygens[1].

En résumé, l'examen combiné des phénomènes du calorique rayonnant et de l'équivalent mécanique de la chaleur nous montre manifestement le calorique comme un simple mouvement vibratoire des molécules. La mesure de l'intensité de ces vibrations se déduit de la dilatation produite, en d'autres termes, du travail accompli par elles; par suite, on considère la température comme variant en raison de la force vive du système. Cette vibration moléculaire quelquefois n'est pas vraiment oscillatoire, mais devient un violent mouvement de projection : tel est le cas des gaz. Dans toutes les théories, les molécules gazeuses sont regardées comme animées d'une force ré-

[1] Galilée, *Science nouvelle*, dialogue I, p. 15, édit. de Bologne, 1655. — Huygens, *De Lum.* loc. cit. plus haut.

Les vibrations acoustiques sont comprises entre 30 et 50000 par seconde, les vibrations lumineuses commencent à 63 trillions pour finir à 940 trillions par seconde. Un intervalle immense semble donc séparer les deux genres de mouvement; mais, en réalité, il n'en est rien. En effet, en dehors des sons compris dans l'échelle harmonique, certaines ondes envoyées par les corps vibrants, quoique frappant l'oreille par successions régulières, sont impuissantes à exciter la sensation d'un son musical. Nous entendons alors des bruits de diverse nature, des bruissements, des crépitations; à ces vibrations succèdent les oscillations calorifiques obscures dont il est très-difficile d'apprécier la vitesse, et finalement l'agitation moléculaire s'exaltant toujours, la rapidité du mouvement devient telle que les ondes engendrées impressionnent la rétine; à ce moment apparaissent les radiations lumineuses.

pulsive ou d'une expansibilité en vertu de laquelle elles choquent fortement les corps qui leur font obstacle. Par suite, on doit admettre que dans ces chocs elles perdent une partie de leur force en la communiquant aux corps qui, libres de céder à leur pression, se mettent en mouvement; d'où abaissement de température et diminution de la force expansive d'un gaz lorsqu'il produit un travail quelconque. Mais comment peut-on concevoir cette force expansive dans les gaz? comment leur est-elle communiquée? Ceci est une autre question. Nous sommes en présence d'un problème pour la solution duquel nos sens nous faisant défaut, il est nécessaire d'y suppléer par le raisonnement en nous appuyant toujours sur l'observation des faits.

Dans tout ce qui précède, nous avons suivi la méthode spéciale à la physique, c'est-à-dire que, puisant aux sources les plus diverses, notre but a été de réunir les connaissances suffisantes pour connaître la nature du calorique. Le parallélisme que nous avons cherché à établir entre les phénomènes de la lumière, de la chaleur et ceux du son, ne contribuera pas peu à rendre notre étude plus facile; mais nous y reviendrons avec détails dans le livre suivant.

Les mécaniciens et les géomètres qui se sont occupés de la question présente l'ont traitée à un point de vue purement industriel ou mathématique, sans se demander quels étaient la nature de la chaleur et son mode d'action. Ils ont envisagé le calorique comme une force, et, basant leur raisonnement sur le principe de l'équivalence entre un travail déterminé et une quantité de chaleur donnée, ils ont établi quelques propositions fondamentales suffisantes pour calculer les effets des machines à feu, mais ils ne se sont pas préoccupés de savoir comment le calorique agit dans l'intérieur des corps.

Cette façon de traiter un problème n'est pas celle du physicien; il doit pénétrer plus avant dans les secrets de

la nature, et pour parvenir à une solution plus complète, il met à profit les recherches des mathématiciens. Indiquons donc les principes fondamentaux sur lesquels sont fondés les calculs analytiques, nous bornant pour le moment à un rapide aperçu.

La chaleur qui pénètre dans un corps quelconque est employée à produire trois effets ou travaux bien distincts :

1° Elle l'échauffe;

2° Elle surmonte les résistances intérieures;

3° Elle produit un travail extérieur s'il y a lieu.

La quantité de chaleur employée au premier travail se détermine d'après la quantité nécessaire pour élever la masse *unité* du corps à 1° de température. Soit K cette quantité, que l'on nomme *capacité absolue;* si le corps passe de t_0 à t_1, supposant $t_1 > t_0$, nous aurons la quantité de chaleur absorbée q représentée par :

$$q = K(t_1 - t_0).$$

Cette valeur, étant une quantité absolue, doit rester constante pour un même corps, quel que soit son état, car elle dépend seulement de l'inertie des molécules et de l'accroissement de force vive qu'elles acquièrent, laquelle est rigoureusement proportionnelle à la température, en faisant abstraction de toutes les autres réactions.

La seconde partie de la chaleur employée est occupée à surmonter les résistances intérieures, et elle accomplit des travaux de plusieurs genres : (*a*) elle triomphe de la cohésion en dilatant les corps et (*b*) en les amenant quelquefois à l'état liquide, et même (*c*) à l'état gazeux. Ainsi les dilatations et les changements d'état sont des travaux accomplis par cette autre portion de la chaleur interne. Posons R = les résistances intérieures, et dV les augmentations de volume. La somme de tous ces travaux sera $\int R dV$. Or, chaque résistance intérieure est assimi-

lable à une pression que la chaleur doit surmonter. Si nous faisons $A =$ l'équivalent calorifique du kilogrammètre, c'est-à-dire $\frac{1}{425}$; tous ces travaux seront effectués par une quantité de chaleur :

$$q' = A \int R dV = A\Lambda,$$

Λ représentant le travail moléculaire.

Lorsque, dans une opération inverse, le corps reviendra à l'état d'où il était parti, cette quantité de chaleur sera restituée toute entière.

Enfin, dans certains cas, le corps chauffé accomplit un certain travail extérieur; il soulève un poids, un piston chargé de la pression atmosphérique, par exemple, etc. Représentons par p la pression dont nous parlons, et par dV l'augmentation de volume; nous aurons la quantité de chaleur équivalente au travail total nécessaire au corps pour passer de V_0 à V_1 exprimée par :

$$q'' = A \int_{V_0}^{V_1} p dV.$$

Donc, la quantité de chaleur totale qui, dans un corps, à la fois fait un travail intérieur, un travail extérieur et échauffe la masse, est donnée par la formule :

$$Q = K(t_1 - t_0) + A\Lambda + A \int_{V_0}^{V_1} p dV.$$

Dans le cas d'un travail extérieur nul, les deux premiers termes de l'expression précédente doivent être seuls conservés, et leur somme représente la chaleur u que l'on doit, dans les conditions ordinaires, appliquer à un corps pour l'échauffer à un degré donné, l'élévation de température s'accompagnant ordinairement d'un travail intérieur; cette quantité de chaleur est la *capacité calorifique ordinaire*.

Si les corps éprouvent un notable changement de volume lors de l'application de la chaleur, pour les gaz, par exemple, il faut distinguer deux chaleurs spécifiques: la première, qu'on appelle *chaleur spécifique sous pression constante*, est la quantité de chaleur nécessaire pour échauffer 1 mètre cube de gaz d'un degré en le laissant se dilater sous sa pression primitive; la seconde qui a reçu le nom de *chaleur spécifique à volume constant*, est la quantité de chaleur qu'il faut donner à ce gaz pour l'échauffer d'un degré, alors que, renfermé dans un récipient inextensible, il ne peut se dilater, et augmente de tension à mesure que la température s'élève. La première de ces deux quantités surpasse la seconde, et il est clair que la différence est précisément la chaleur détruite ou transformée dans le travail de la dilatation.

La thermo-dynamique repose sur deux notions fondamentales : la première est le principe d'équivalence, la seconde peut être admise comme un axiome. En effet, il est évident que pour obtenir un travail extérieur utile par voie thermique, il ne suffit pas que la chaleur *passe simplement* d'un corps plus chaud à un corps plus froid, mais encore il faut qu'il y ait convection de la chaleur d'un corps à un autre, c'est-à-dire que dans une machine motrice les choses doivent être disposées de telle sorte que le corps circulant dans l'appareil éprouve des variations de température dans des sections différentes du circuit parcouru par lui ; ce second principe est d'une importance extrême au point de vue des applications de la chaleur, mais au point de vue de la théorie pure, il est loin de présenter le même intérêt. Il n'en est pas ainsi de la distinction entre les trois effets produits par la force vive de la chaleur lorsqu'elle se communique à un corps; aussi cette division est-elle pour nous le véritable programme que nous développerons dans le courant du premier livre.

Nous examinerons donc quelle idée nous pouvons nous faire de ces travaux intérieurs, comment nous devons comprendre la capacité calorifique, et ces phénomènes, dits de chaleur latente, qui s'observent lors d'un changement d'état. Nous rechercherons l'influence des pressions internes sur les lois acceptées jusqu'à présent touchant les échanges de chaleur. Nous verrons que ces lois sont sensiblement modifiées et que la plupart d'entre elles sont des *lois limites*, vraies théoriquement, mais qui appliquées aux corps tels que nous les connaissons sont inexactes à cause des perturbations qu'elles exercent les unes sur les autres. Les lois de Gay-Lussac et de Mariotte s'appliquent exactement aux gaz parfaits, c'est-à-dre à ceux dans lesquels le travail intérieur est nul; elles supposent les températures mesurées d'une façon absolue et non rapportées à un zéro purement conventionnel; enfin les volumes eux-mêmes ne doivent pas être estimés d'après les volumes apparents, mais d'après les volumes compris entre les atomes. Du reste, la destinée de ces lois a été assez singulière et en tout comparable à celle des lois qui régissent le mouvement elliptique des planètes. Ces dernières, trouvées à l'aide de données imparfaites, ont conduit au principe de la gravitation universelle, et les astronomes, en développant les conséquences de ce principe, ont reconnu que le mouvement des planètes n'était en réalité jamais elliptique.

Nous suivrons, dans notre étude, des phénomènes thermiques, la marche indiquée par l'évolution historique de la question. Nous dirons :

1° Comment les corps ont été envisagés jusqu'ici au point de vue de leur état physique;

2° Comment nous devons les concevoir d'après les théories modernes;

3° Quelles modifications ces idées nouvelles apportent aux lois acceptées sans conteste jusqu'à ces derniers temps.

CHAPITRE VI

IDÉE GÉNÉRALE DES DIVERS ÉTATS DES CORPS DANS LA THÉORIE DYNAMIQUE DE LA CHALEUR. — DE L'ÉLASTICITÉ.

La théorie la plus généralement acceptée jusqu'à ce jour par les physiciens sur la nature des corps est ainsi exposée par Poisson[1] :

« Toutes les parties de la matière sont soumises à deux espèces d'actions réciproques : une attractive, indépendante de la nature des corps, proportionnelle au produit des masses et en raison inverse du carré des distances; son action s'étend jusqu'à l'infini dans l'espace, et elle produit tous les phénomènes d'équilibre et de mouvement étudiés dans la mécanique céleste; l'autre est attractive ou répulsive, elle dépend de la nature des molécules et de la quantité de calorique qu'elles renferment; son intensité décroît très-rapidement quand la distance augmente, et son action devient insensible, lorsque la distance est à peine perceptible. Les corps sont formés de molécules séparées, c'est-à-dire de portions de matière pondérable, d'une grandeur inappréciable, séparées par des espaces vides ou pores dont les dimensions sont imperceptibles à nos sens. Les molécules sont tellement petites et voisines l'une de l'autre, qu'une portion d'un corps qui en renferme un nombre extrêmement grand peut cependant être supposée extrêmement petite et son volume insensible... Indépendamment de la matière pondérable dont elle est formée, chaque molécule renferme en outre une certaine matière impondérable à laquelle on attribue la production des phénomènes de chaleur... La quantité de calorique répandue dans le vide doit être considérée comme insensible en comparaison de celle qui reste adhé-

[1] *Journal de l'École polyt.*, 20e cahier, p. 4.

rente aux molécules matérielles, puisque d'après les expériences de Gay-Lussac, en diminuant ou en augmentant rapidement le volume d'un espace vide, il n'y a aucune variation de température. »

De plus, le calcul des forces attractives a montré que l'attraction exercée sur une molécule quelconque par toutes les autres molécules d'un corps, peut être considérée comme formée de deux composantes : la première est l'action de la masse totale; elle resterait la même si le corps considéré avait la forme sphérique, ou si toute sa masse était réunie au centre de gravité; la seconde dépend de la distribution de la matière elle-même, et varie nécessairement avec la forme du corps. Cette dernière produit les actions secondaires qui se manifestent seulement aux plus petites distances; c'est elle qui, d'après les physiciens, déterminerait l'état solide et cristallin des corps. Quand, par la dilatation, les molécules se sont éloignées, ces actions cessent d'être sensibles, et l'attraction et la répulsion sont en équilibre; alors le corps est liquide, et, finalement, devient gazeux lorsque la force répulsive du calorique est prédominante.

Telle est la façon d'expliquer l'état physique des corps dans la théorie admise jusqu'à présent, qui considère le calorique comme une substance. La doctrine de la matérialité du calorique étant abandonnée, il faut nécessairement admettre un principe à l'aide duquel on puisse expliquer la production des phénomènes attribués à la force répulsive, et ce principe ne sera autre que le mouvement vibratoire des molécules du corps lui-même. Quant à l'attraction moléculaire, nous conserverons, pour le moment, ce mot comme expression d'un fait, mais nous verrons à en donner l'explication en temps convenable, et nous montrerons alors comment cette attraction peut, elle aussi, prendre son origine dans le mouvement. Actuellement bornons-nous à remarquer que

Poisson insiste sur l'absence complète de manifestations calorifiques dans le vide, fait très-favorable à la nouvelle théorie; car il est évident que si la matière manque on ne peut la trouver en mouvement. Il reste donc à exposer comment nous devons concevoir le mouvement intérieur des corps.

L'expansibilité indéfinie des gaz conduit naturellement à l'idée que leurs molécules sont douées d'un mouvement de projection, et que, par suite, elles sont dans un état continuel de répulsion réciproque. Ce mouvement de projection résulte d'un choc éprouvé par les molécules, et celles-ci le conservent indéfiniment en vertu de leur inertie quand elles se trouvent dans un espace libre, alors elles se dilatent indéfiniment; mais dans les récipients fermés elles se heurtent réciproquement et pressent les parois qui les renferment.

Dans ce conflit moléculaire, si les molécules matérielles étaient privées de toute force intérieure, leur mouvement s'éteindrait, et elles se réuniraient les unes aux autres, comme le sont les atomes des corps durs, suivant les mécaniciens. Aussi les auteurs de cette théorie, Clausius et d'autres, ont-ils attribué aux molécules une certaine élasticité en vertu de laquelle elles peuvent rebondir lorsqu'elles choquent leurs voisines ou les parois des vases, de cette façon elles peuvent conserver toute leur force vive; mais cette élasticité étant du genre des forces secondaires produites par d'autres forces primordiales, il est évident que, s'il est possible d'admettre son existense dans une molécule composée, on ne peut faire de même quand il s'agit des atomes élémentaires. En effet, l'élasticité, conçue d'après les idées acceptées, suppose un espace vide dans l'intérieur de la molécule qui change de forme en se comprimant, pour revenir ensuite à sa figure première; or, nous regardons les atomes comme impénétrables, et non comme des rénnions de particules solides, par suite ils ne peuvent

renfermer des espaces vides leur permettant dilatation et contraction. A la vérité, ce que nous appelons molécule d'un gaz *simple*, c'est-à-dire *chimiquement indécomposable*, n'est pas un atome élémentaire, ou, tout au moins, peut ne pas en être un. Alors cette molécule gazeuse étant un agrégat de véritables atomes, il se peut très-bien qu'elle ait des pores intérieurs, et, en général, un certain nombre de propriétés qui n'appartiennent pas à ses atomes constitutifs; il n'est donc pas absurde de la supposer douée d'élasticité. Huygens a admis cette hypothèse pour l'éther. A son avis, les particules éthérées sont composées d'autres plus petites; mais, en examinant les choses à fond, on voit que de cette manière on recule la difficulté sans la résoudre. Nous croyons pouvoir montrer qu'il n'est aucunement nécessaire d'accepter une semblable élasticité comme force primitive, et que la répulsion apparente des atomes et leur collision réciproque peuvent être rapportées simplement à un mouvement qui leur serait propre, pour cela il suffit de les supposer en rotation. Prouvons-le.

Parmi les beaux théorèmes découverts par Poinsot sur la théorie du choc des corps en rotation, se trouve celui relatif à leur *réflexion* contre un obstacle résistant. Il nous apprend que, par la seule rotation, *corps dur* et *non élastique* peut rebondir absolument comme un corps parfaitement élastique; il y a mieux : un de ces corps, lancé contre un obstacle fixe, est souvent renvoyé avec une vitesse supérieure à sa vitesse initiale. Le subtil géomètre fait remarquer comment ce phénomène, paradoxal en apparence, est dû à la transformation d'une partie du mouvement rotatoire en mouvement de translation; d'où il résulte une augmentation de la vitesse du centre de gravité. D'après les théories ordinaires du choc, dans lesquelles on ne tient aucun compte du mouvement de rotation, la proposition précédente est absurde, et cependant elle est parfaitement établie. Ainsi, à côté des cas de *réflexion* ordinaire se trou-

vent les phénomènes de *progression*, pour employer l'expression de Poinsot, on pourrait aussi les appeler *réflexions négatives*.

Dans la reflexion négative, après le choc, le centre de gravité du corps revient en avant avec une vitesse supérieure à celle qu'il possédait d'abord[1]. Ces questions forment une branche toute neuve et très-intéressante de la mécanique; ils se démontrent facilement en composant les deux mouvements de rotation et de translation, considérés par rapport aux centres de gravité, de rotation et de percussion, et on arrive facilement à comprendre que, d'une *façon générale*, on puisse dire : un choc, quel qu'il soit, ne peut annihiler en même temps dans un corps les deux mouvements de rotation et de translation; car, si le choc est excentrique, il pourra détruire la rotation et non la translation, et si la direction du choc passe par le centre de gravité, il pourra anéantir la translation, mais non la rotation. Ainsi, la quantité de mouvement perdue d'un côté sera gagnée de l'autre : la rotation pourra être ou changée de sens ou simplement accélérée, selon le point du corps qui sera frappé; d'où la notion des centres de *conversion*. On rencontre des exemples de réflexion, succédant au choc de corps en rotation, dans le mouvement des disques lancés par les discoboles, dans celui des palets lancés de façon à former des ricochets, dans les chocs imprimés aux toupies pendant leur rotation, etc. Les joueurs de billard savent parfaitement combien la rotation des billes modifie les lois du choc des corps élastiques établies dans les traités élémentaires.

Les sauvages de l'Australie, avec leur Boomerang, ob-

[1] Voyez Poinsot, *Questions dynamiques sur la percussion des corps*, p. 21 et 29 du mémoire tiré à part, et aussi le journal de Liouville. On doit donner une très-grande attention au beau théorème qui lie tous les centres de gravité, de rotation, de réflexion, de percussion et de conversion (page 36).

tiennent de remarquables mouvements de rétroversion. L'arme ainsi nommée est faite d'un morceau de bois en forme de 7 allongé, un peu mince mais long (fig. 4). Ce trait, lancé d'une certaine manière, prend un rapide mouvement de rotation en décrivant sa trajectoire dans l'espace, frappe l'objet qu'on s'était proposé d'atteindre, et si le coup a été bien dirigé il revient tomber aux pieds du guerrier qui un instant avant le projetait à travers les airs. Bien plus, sans rencontrer aucun obstacle, le boomerang est souvent renvoyé par le seul effet de la résistance de l'air, et on peut facilement réaliser en petit dans une chambre un phénomène de ce genre en faisant usage d'un morceau de carton taillé suivant la forme indiquée ci-dessus.

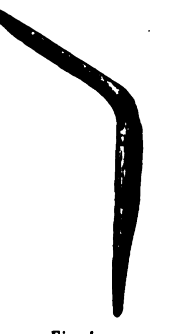


Fig. 4.

Cela posé, nous pensons que si l'on attribue aux molécules des corps un mouvement composé, le mieux est de les supposer animées simultanément de *rotation* et de *translation*. De cette manière, on comprendra certains phénomènes dont rendaient difficilement compte les hypothèses admises jusqu'ici. En effet, à bien examiner les choses, l'élasticité seule, avec les propriétés qu'on lui accorde ordinairement, ne suffit pas pour expliquer complétement les phénomènes de la propagation de la chaleur. En effet, un mouvement excité dans un milieu élastique, c'est-à-dire composé de molécules élastiques, ne peut jamais *revenir en arrière*, à moins qu'il ne rencontre un corps étranger faisant obstacle ou qu'il ne survienne en un certain point du milieu propagateur une variation de densité. Ce mouvement produit une onde toujours progressive. Or, les choses ne se passent pas ainsi pour le calorique : si l'on tient pen-

dant un certain temps une source de chaleur en contact avec l'extrémité d'un tube horizontal plein de gaz, ou d'une barre métallique, le mouvement calorifique se propage suivant la longueur, et, si on éloigne la source, l'extrémité échauffée continuera néanmoins à présenter une température plus ou moins élevée. Le phénomène ne sera pas le même que celui observé sur une colonne d'air ou une verge métallique : mises en mouvement par un corps vibrant placé à une de leurs extrémités, cette partie revient au repos aussitôt le corps excitateur éloigné, ainsi que cela doit arriver dans un milieu doué seulement de la faculté de propager les mouvements à la manière des milieux élastiques.

Donc, pour la chaleur, il y a un mode spécial de transmission de mouvement, dans lequel le mouvement peut revenir en arrière et se commûniquer dans tous les sens; et il semble que ce mode de propagation ne soit autre que celui qui, dans les mouvements rotatoires, est dit transmission par *progression*, ou encore par *conversion*.

En effet, les molécules étant animées de rotation lorsqu'elles se rencontreront elles rebondiront après le choc soit positivement, soit négtivement, car leurs deux mouvements de rotation et de translation ne se détruiront pas de telle sorte qu'elles puissent rester accolées l'une à l'autre ; mais il n'en sera plus ainsi lorsque la rencontre aura lieu suivant l'axe de rotation. Si l'axe est permanent les mouvements s'entre-détruiront et les molécules se réuniront, si l'axe n'est pas permanent[1] la juxtaposition des

[1] Dans les traités de mécanique, on distingue deux cas dans le mouvement de rotation : ou bien l'axe autour duquel tourne le corps passe toujours par les mêmes *points physiques*, et alors il est dit *permanent*, ou bien il passe d'une série de points à une autre, et on le nomme alors *axe non permanent* ou *instantané*. Un gyroscope, maintenu dans une situation fixe, tourne autour d'un axe qui, physiquement, est toujours le même; il présente un axe permanent. Lorsqu'un corps lancé à travers l'air pirouette sur lui-même, son axe change à chaque instant. Ainsi la terre, en vertu de son inertie, de-

particules matérielles n'est plus nécessaire, mais elle est possible. Ces considérations sur la neutralisation des mouvements moléculaires jettent un jour tout nouveau sur le difficile problème de la constitution intime des corps. Un exemple éclaircira notre pensée.

Supposons un cas extrême, c'est-à-dire le choc de deux atomes doués seulement de translation, ou bien encore, se heurtant de telle façon qu'ils ne peuvent rebondir. Évidemment ces deux atomes resteront unis ensemble de même que ceux des corps nommés *durs* par les mécaniciens, et ils formeront un système animé du mouvement de translation, résultant des deux autres. Ce système pourra agir comme un corpuscule unique d'une masse double ou triple, en général multiple de celle d'un atome simple, suivant que deux, ou un plus grand nombre d'atomes se seront réunis de cette manière. Nous avons là un exemple manifeste d'un agrégat d'atomes liés les uns aux autres, non par l'influence d'une attraction quelconque, mais par la simple inertie, et ce groupe présentera une certaine cohésion; car, pour le détruire, il faudra une force étrangère capable de surmonter l'inertie des atomes formant la molécule ainsi composée.

Nous ne prétendons pas rendre compte de la cohésion par les seules considérations qui précèdent, mais ces remarques font entrevoir un moyen très-simple d'expliquer certaines circonstances de l'adhérence des molécules matérielles. Avant d'aller plus loin, il est utile de distinguer

vrait avoir un axe de rotation permanent; mais, à cause de l'action perturbatrice exercée par le soleil et la lune sur la protubérance équatoriale, son axe n'est pas rigoureusement permanent, et on trouve que le pôle vrai décrit chaque jour un cercle excessivement petit de 0m,14 de rayon autour du pôle moyen. Ce déplacement n'étant nullement appréciable à nos procédés de mesure, car il n'atteint pas un centième de seconde, les astronomes n'en tiennent pas compte, et dans les déterminations des latitudes on considère ces quantités comme constantes; autrement dit, l'axe est supposé permanent.

les uns des autres les divers assemblages d'atomes. On doit admettre :

1° Les atomes *isolés* et *primitifs*, qu'il serait bon d'appeler exclusivement les *atomes ;*

2° Les groupes *multiples* d'atomes. Ils peuvent être de forme plus ou moins compliquée. On pourrait les nommer *molécules élémentaires*, peut-être par leur mode différent de groupement donnent-ils naissance aux différentes espèces de substances, chimiquement indécomposables jusqu'à présent, et appelées *corps simples;*

3° La réunion de ces molécules élémentaires forme les molécules des composés chimiques qui, pour la rigueur du langage, doivent être désignées sous un nom spécial : on peut les appeler *molécules chimiques*, ou, si l'on veut, *hétérogènes;* il faut donc comprendre que l'hétérogénéité résulte plutôt de la diversité de l'arrangement des atomes que d'une véritable diversité de nature, et cela pour des raisons que nous exposerons plus loin;

4° Finalement l'assemblage des molécules homogènes ou hétérogènes produit les *parcelles* des corps qui, réunies suivant certaines lois que nous citerons, peuvent donner naissance aux *molécules intégrantes* des cristallographes.

Sans nous astreindre à employer toujours les expressions précédentes avec la signification précise que nous venons de leur donner, nous nous conformerons à ces distinctions autant que faire se pourra, et surtout chaque fois que la clarté du discours l'exigera.

En résumé, dans les corps gazeux, il n'est pas nécessaire d'admettre d'autres forces répulsives que celles résultant du *mouvement moléculaire*, car elles permettent d'expliquer les phénomènes d'élasticité.

Par suite, on peut se dispenser de supposer dans la matière des forces répulsives; ancienne hypothèse dont la moindre difficulté était d'assigner à quelles limites ces

agents mystérieux cessent leur action pour permettre au principe antagoniste, c'est-à-dire à l'attraction, d'exercer la sienne.

En effet, comment ne pas être arrêté par la contradiction suivante? Aucun corps ne résiste sans se décomposer à un accroissement indéfini de température; il devient d'abord liquide, puis il arrive à l'état gazeux, et enfin il se résout en ses principes élémentaires. Or, tandis que la force thermique présente une intensité aussi considérable en agissant à de très-petites distance, son action devient tout à fait nulle si les distances sont grandes, et, même lorsqu'elles deviennent appréciables, rien n'indique que l'effet de cette force soit sensible. Cette propriété convient peu à la force antagoniste de l'attraction moléculaire, laquelle, sous le nom de gravitation, agit à des distances très-considérables.

Ce fait inexplicable dans les anciennes théories, si ce n'est en admettant des limites arbitraires, devient simple dans la théorie mécanique; toute répulsion cessant nécessairement à la limite où cesse la collision moléculaire, celle-ci devant s'éteindre à la limite des excursions moléculaires. Dans les gaz ces limites sont fort étendues, mais dans les liquides et les solides elles sont certainement très-restreintes, car l'excursion est mesurée par la distance d'une molécule à sa voisine.

Les fluides, et spécialement les fluides élastiques, présentent certaines propriétés mécaniques qui sont caractéristiques de leur état et dont on doit rendre raison dans toute théorie. Exemple la *pression hydrostatique*. Or, il n'est pas difficile de montrer comment une semblable pression doit se produire dans un milieu ayant la constitution attribuée par nous aux gaz, c'est-à-dire formé d'atomes dans une continuelle agitation.

En effet, un tel milieu, non-seulement doit être in-

définiment expansible, mais il doit encore exercer une pression égale dans tous les sens, pression qui constitue la *tension* gazeuse. Pour le prouver, supposons que la violence de la collision, ou la somme des molécules qui s'entre-choquent, moindre dans un point que dans un autre, les molécules rencontreront dans cette direction une moindre résistance, et dès lors il y aura afflux de matière en ce point, conséquemment accélération de mouvement. Ainsi le mouvement intérieur tend vers un régime uniforme, vers une égalisation d'intensité, d'où il résulte une sorte *d'équilibre dynamique* dans lequel toutes les parties du milieu sont animées d'une vitesse égale, possèdent, d'après l'expression consacrée, une égale *force vive* et exercent par suite un choc ou une pression égale dans tous les sens.

En résumé, d'après la théorie dynamique de la chaleur, la température dépend de la quantité d'action ou de force vive renfermée dans chaque molécule : autrement dit, chaque molécule étant animée d'une certaine vitesse, l'intensité de son choc devient la mesure de sa température. Il en résulte que l'équivalent mécanique de la chaleur étant un nombre assez élevé, la quantité d'action ou force vive contenue dans un gaz est énorme; bientôt nous en chercherons l'expression numérique. Dans cette manière de voir, le passage de la chaleur d'un corps à un autre devient une simple communication de mouvement, et si l'équilibre de température tend sans cesse à s'établir, la raison en est dans la tendance du mouvement calorifique à se répandre uniformément dans la masse entière, particularité sur laquelle nous nous sommes expliqué plus haut. La communication de cette force vive à un corps, ou seulement son augmentation dans ce corps, peut résulter d'un effet mécanique ou d'une réaction chimique; mais, dans tous les cas, on observe que le corps dont l'énergie est la plus grande cède une partie de sa force vive à celui qui en possède une

moindre quantité. Il en est exactement de même dans les communications de mouvements. Donc, si un gaz est mis en contact avec un corps dont la force vive soit moindre que la sienne, il lui donnera une partie de sa propre énergie, et, par suite de cette perte, l'amplitude des excursions moléculaires diminuera. Le contraire arrivera si les conditions sont inverses.

Tous les raisonnements précédents supposent le cas idéal d'un gaz parfait : alors les échanges de mouvement se font rigoureusement suivant les lois de la mécanique et conformément au principe des forces vives. Si on regarde la température comme proportionnelle à la force vive des corps, elle doit évidemment se mesurer non pas à partir d'un zéro arbitraire, tel que celui correspondant à la fusion de la glace, mais il faudra la compter en prenant pour zéro le point où les vitesses atomiques sont nulles (les masses ne pouvant s'anéantir). C'est le zéro absolu; nous aurons plus tard à le déterminer. De même, si la force vive des atomes devient plus grande, ils décrivent des oscillations plus étendues; le volume du corps augmentera; et, pour mesurer ces variations, il ne faudra pas se borner à noter les volumes extérieurs, mais le rapport de ces volumes à celui que prendrait le corps si les atomes, étant dans un repos complet, arrivaient exactement au contact.

En un mot, jusqu'ici, nous avons supposé qu'il ne devait se passer au sein d'une masse gazeuse d'autres réactions que celles propres aux molécules. Mais si aux réactions moléculaires s'ajoute l'influence soit de quelque matière interposée entre les particules matérielles, soit de ces puissances mystérieuses dites forces moléculaires, il faut tenir compte de ces actions spéciales en outre des résistances extérieures exercées par les parois du récipient qui renferme le gaz et des pressions qui se développent dans la masse, par le simple effet de l'inertie. La loi de la variation du volume des gaz indiquée plus haut cesse dès

lors d'être rigoureuse, et voici comment on doit la modifier : les pressions p et p' sont remplacées par $P + R$ et $P_1 + R_1$; les volumes V et V' par $V_0 - \Psi$ et $V' - \Psi$, Ψ étant le volume représenté par les atomes réunis les uns contre les autres sans laisser aucun vide. On a alors :

$$\frac{R_1 + p_1}{R + p} = \frac{V_0 - \Psi}{V_1 - \Psi} \times \frac{T_1}{T_0}.$$

Ici T_1 et T_0 sont des températures absolues. Telle est la loi qui, si l'on veut raisonner rigoureusement, doit être substituée à celle reçue jusqu'ici, et à laquelle sont attachés les noms de Gay-Lussac et de Mariotte[1].

CHAPITRE VII

DE L'ÉTAT LIQUIDE ET SOLIDE DES CORPS.

Il est admis dans la science comme fait fondamental que, par une soustraction progressive de chaleur, tout corps gazeux se convertit en liquide, puis en solide. Les exceptions peu nombreuses qui nous sont offertes par les gaz permanents, ne prouvent rien autre, si ce n'est que le point de liquéfaction de ces gaz est inférieur à la plus basse température obtenue par nos moyens artificiels. Tout abaissement de température entraîne un affaiblissement correspondant du mouvement intérieur, et une diminution de ce dernier doit produire un rapprochement moléculaire, car l'impulsion étant moindre, l'amplitude de la vibration moléculaire décroît, et alors peuvent entrer en action les pressions exercées par les forces attractives ou par l'impulsion des parties environnantes, celles-ci étant pondérables ou impondérables. Il est évident que, par des déperditions successives, la vitesse moléculaire

[1] Voyez Hirn, *Théorie mécanique de la chaleur*, Ire partie, p. 221.

se trouvera diminuée à un tel point, que la molécule ne pourra plus sortir de la sphère d'activité de ses voisines, et alors elle sera obligée d'osciller suivant une courbe fermée plus ou moins régulière. Alors cessera le mouvement d'expansion, le corps deviendra liquide, et la gravité trouvant les molécules privées de mouvement de projection et animées d'une vitesse qui n'est pas supérieure à celle qu'elle peut leur imprimer, exercera une action prépondérante ; aussi le système prendra une surface de niveau sous l'influence presque exclusive de la gravité[1]. Mais, à la surface libre, les molécules ne sont pas soumises à une attraction égale dans tous les sens ; elles pourront donc s'isoler, obéir aux forces de projection et passer à l'état gazeux ; ainsi s'explique l'évaporation.

Dans les liquides les axes de rotation sont probablement dirigés de tous les côtés, ou bien encore ils peuvent être de position instable. De plus, la distance des molécules est telle que l'une n'entre pas dans la sphère d'activité de l'autre, pour employer le langage de ceux qui admettent les attractions de la matière. Toutes les forces étant en équilibre, les molécules céderont à la plus légère impulsion et posséderont la mobilité caractéristique des fluides.

En continuant à enlever de la chaleur à un corps liquide, c'est-à-dire à diminuer la vitesse des molécules, il arrivera que leur rapprochement étant encore plus considérable, les unes pénétreront dans la sphère d'activité des autres. Alors les attractions s'exerçant dans des directions dépendant de la forme des molécules, celles-ci tendront à s'orienter et se disposeront régulièrement, pour former un corps solide tout en perdant leur mobilité. Dans la théorie dynamique, l'existence de ces attractions comme forces

[1] L'atmosphère terrestre elle-même a été considérée par Poisson comme un liquide à sa limite supérieure, où la force expansive est équilibrée par la gravité.

primitives n'étant point admise, la théorie des divers états de la matière est basée également sur la diminution des distances intramoléculaires, mais elle est différente.

Nous avons dit plus haut : à la suite du choc de plusieurs atomes, il peut arriver que ceux-ci prenant un mouvement commun, contractent une adhérence analogue à celle que l'on rapporte habituellement à la cohésion. Les veines liquides nous présentent un exemple remarquable de cette adhérence moléculaire : au sortir d'un orifice, elles offrent l'aspect d'un solide, continu, précisément parce que toutes les molécules sont animées d'une vitesse égale ; et lorsque cette vitesse est considérable, par exemple dans les jets qui sortent des récipients sous de très-hautes pressions, on constate non-seulement par la simple vue, mais même par le toucher, que les veines liquides sont rigides et résistantes comme si elles étaient formées d'un tout cohérent. A notre avis, ce seul principe ne suffit pas pour expliquer les phénomènes de la cohésion. La mécanique intérieure des corps, pour être complète, demande encore des développements. Bornons-nous à dire maintenant que les faits exposés jusqu'ici n'excluent l'idée ni d'une action exercée sur les molécules par les forces dites attractives, ni d'une pression extérieure agissant sur elles et produite par l'éther interposé entre les atomes, et même il ne serait pas impossible qu'une semblable pression fût la véritable cause de la cohésion dans les corps composés. Cette opinion n'est pas aussi neuve ni aussi étrange qu'elle peut le paraître à première vue. Galilée croyait la chose explicable par cette considération que le vide est impossible [1] ; cette manière de voir évidemment était erronée, parce que le vide signifiait ici le vide d'air. Mais aujourd'hui de récentes découvertes ayant démontré l'existence d'un milieu beaucoup plus subtil et plus étendu

[1] *Dialogues de la Science nouvelle*, journée I, p. 14. — Grove, *Corrélation*, p. 175.

que l'atmosphère, nous pouvons au moins nous demander s'il ne pourrait pas contribuer à un tel effet. Comme nous devons traiter longuement ce sujet un peu plus loin, nous nous contenterons d'en donner ici un aperçu.

Toute molécule pondérable, en tournant rapidement autour de son axe, doit produire dans l'éther environnant une sorte de tourbillon d'un rayon très-petit, mais égal à celui nommé rayon de sphère d'activité moléculaire, et donner ainsi naissance à une diminution de pression, que l'éther voisin tend à équilibrer. Or un de ces petits tourbillons ne peut dépasser les limites d'un autre que lorsque la distance des molécules est moindre que la somme des rayons de ces tourbillons eux-mêmes. Dès lors, si les distances intermoléculaires ont diminué au point d'être inférieures à cette limite, les sphères d'activité empiéteront les unes sur les autres, et la cohésion pourra résulter de la réunion de plusieurs tourbillons en un seul, ou de l'absorption de plusieurs petits par un plus grand. Poursuivant le développement de notre hypothèse, nous dirons que les molécules étant rapprochées, l'une peut entrer dans le tourbillon d'éther qui environne l'autre, et alors les rotations aidées par l'influence mécanique du milieu tendent à s'effectuer parallèlement aux axes dans une direction déterminée en rapport avec les moments d'inertie des molécules elles-mêmes. Ainsi se produit une enveloppe ou sphère d'activité qui, commune à plusieurs atomes, forme entre eux le lien indispensable pour la constitution des solides et détermine leur mode de cristallisation. Or, d'après un principe de géométrie il est impossible de remplir complétement avec des sphères égales un volume donné, il existe donc toujours quelques lacunes dans diverses directions, et on s'explique alors l'infinie variété des formes cristallines. Les rotations peuvent également s'accomplir soit autour d'axes fixes, ou variables de position et animés de ces mouvements dits de précession ; il en résultera

une grande diversité des propriétés physiques des solides, telles que densité, ténacité, élasticité, etc.

Voilà quelle idée générale on peut se faire des trois états physiques de la matière dans la théorie dynamique de la chaleur. Voyons maintenant si cette manière de voir est sanctionnée par l'observation.

La théorie que nous rappelons ici fut ébauchée par Cauchy[1] vers la fin de 1839 ; se fondant sur la quantité de chaleur absorbée pendant la vaporisation, il annonçait l'existence d'un mouvement de projection dans les gaz dont les molécules, d'après lui, décrivaient des orbites en tournant sur elles-mêmes ; tandis que dans les liquides et les solides le mouvement se réduisait à de simples oscillations.

Plus tard, Clausius affirma hautement l'existence de la force de projection des molécules gazeuses et du mouvement orbitaire ou rotatoire dans les liquides et les solides. L'hypothèse des petits tourbillons moléculaires a été jusqu'ici acceptée avec empressement par les physiciens partisans de l'éther. Rankine, Rodtenbacher, Challis et d'autres ont accepté cette manière de voir, et ils ne craignent nullement revenir par cette voie aux tourbillons de Descartes. Ils se sont déclarés partisans de ces idées, cependant ils ne possédaient pas encore toutes les notions nécessaires pour établir un système complet. Nous développerons ces vues théoriques en leur lieu. Pour l'instant, les indications sommaires données plus haut suffisent, et nous répétons encore une fois que si quelques-uns trouvent l'hypothèse des petits tourbillons un peu hasardée, ils peuvent au moins, jusqu'à plus ample informé, conserver l'ancienne théorie des attractions; dans la suite, nous montrerons quelle est la vraie valeur de cette dernière. De toutes façons, il n'est pas absolument nécessaire d'accep-

[1] Voyez *Comptes rendus*, vol. IX.

ter immédiatement ces hypothèses ; il suffit de regarder comme fait démontré que les atomes ont une très-grande tendance à se réunir ; telle est, du reste, l'opinion de tous les physiciens.

Pour donner une idée des mouvements moléculaires des corps, nous avons placé ci-dessous des figures relatives aux trois états physiques, dans lesquelles on a représenté la route que doit suivre une molécule dans l'intérieur de la masse par rapport aux autres supposées fixes.

Dans la figure 5, la ligne polygonale qui serpente indéfiniment dans l'intérieur du corps, représente la trajectoire d'une molécule gazeuse. Cette molécule passe librement d'un groupe à l'autre, heurtant tantôt celui-ci, tantôt celui-là, subissant des réflexions positives ou négatives, changeant de direction à chaque instant, ayant en un mot un mouvement comparable à celui que certains astronomes attribuent aux comètes hyperboliques qui passent d'un système stellaire à un autre.

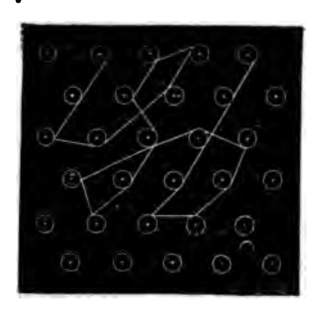


Fig 5.

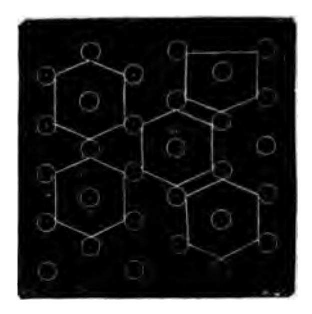


Fig. 6.

Les orbites fermées de la figure 6 représentent l'oscillation moléculaire dans un corps liquide. Les molécules n'ont point d'axe stable de rotation. L'orbite de chacune d'elles se réduit à la figure formée par les molécules voisines, et il

ne se produit aucun mouvement de translation dans ce système en dehors de l'agitation de toute la masse. Ici l'orbite est hexagonale, parce que l'on a supposé les atomes distribués sur un plan, de façon à figurer des triangles équilatéraux, mais elle pourrait être très-différente.



Fig. 7.

La figure 7 se rapporte à l'état solide. On doit imaginer les molécules encore plus rapprochées que dans le cas précédent et présentant des axes de rotation dirigés parallèlement les uns aux autres, enfin un plus grand nombre de molécules sont comprises dans une même sphère d'activité. Leurs mouvements sont de moindre amplitude que ceux des liquides et sont réduits à de simples oscillations sans aucune translation dans une orbite plus ou moins étendue, le transport intérieur dans la masse étant impossible.

Avant d'aller plus loin, nous croyons nécessaire de résoudre une difficulté qui se présentera naturellement à l'esprit : si le calorique est produit par des chocs et des collisions moléculaires, comment se fait-il qu'à la longue ce mouvement ne s'éteigne pas ? Les physiciens répondent : De même que le mouvement ne peut prendre naissance sans cause, de même il ne peut se détruire sans cause. En un mot, ils admettent le mouvement indestructible comme la matière; et à leur avis, si les hommes ont été amenés peu à peu à dire que la matière ne pouvait s'anéantir, bien que dans certains cas *il serait impossible de prouver le contraire*, de même on arrivera à poser comme axiome que le mouvement lui aussi ne s'anéantit pas. La quantité

d'action qui a produit le mouvement dans l'origine, c'est-à-dire la *force première*, reste indestructible dans le système. Le mouvement déterminé par cette puissance initiale se transforme : de translation il devient vibration ou rotation, passe d'un corps à un autre, se subdivise et se communique à un nombre de corps de plus en plus grand, si bien qu'il est impossible de nous représenter d'une façon sensible, comment les choses s'accomplissent aux confins de l'espace, mais assurément le mouvement ne s'annihile pas. En un mot, d'après les physiciens, la production du mouvement aussi bien que celle de la matière ne peut s'expliquer que par une création[1].

Nous ne voulons pas assumer sur nous l'entière responsabilité de cette explication ; cependant, sans entrer dans la question métaphysique de la possibilité ou de l'impossibilité de la destruction du mouvement, nous dirons qu'au point de vue expérimental on peut toujours reconnaître la conservation de mouvement. Constamment on peut retrouver le mouvement tout entier dans les effets produits, et remonter à ses origines, alors même qu'il semble ou s'anéantir ou se créer subitement... « Une masse de charbon en combustion fait naître directement de la chaleur et indirectement de la force mécanique. D'où vient cette force?... Dans le développement du végétal l'acide carbonique est la matière qui fournit le carbone de la plante, et le rayon solaire est l'agent qui sépare les atomes, mettant l'oxygène en liberté, et permettant au carbone de se transformer en fibre ligneuse. Laissez tomber les rayons solaires à la surface du sable, il s'échauffe et finalement rayonne au dehors la chaleur qu'il a reçue ; laissez tomber les rayons solaires à la surface d'une forêt, la quantité de chaleur qu'elle rayonnera sera moindre que la quantité absorbée, car l'énergie d'une partie des rayons du soleil est employée à faire croître les arbres. Sans l'in-

[1] Grove, *Corrélat des forces physiques*, p. 259, et conclusion finale, p. 265.

tervention du soleil la réduction de l'acide carbonique ne peut avoir lieu, et lorsqu'il a produit son effet, il a dépensé une quantité de lumière équivalente au travail moléculaire accompli. Ainsi sont formés les arbres, et ainsi, lorsque le coton s'enflamme, l'oxygène s'unit à son cher carbone, et cette combustion du coton fait naître une quantité de chaleur égale à celle qui avait été perdue par le soleil pour le développer au sein du végétal [1]. » Tel est, sur ce point, le raisonnement d'un célèbre physicien, et cette doctrine peut s'appliquer à tous les phénomènes de la nature liés entre eux par une merveilleuse solidarité.

Il est facile de s'expliquer l'indestructibilité du mouvement, grâce au principe général de ces transformations. En effet, d'après ce que nous avons exposé plus haut, ou bien on adopte l'opinion la plus répandue jusqu'à ce jour, et l'on considère les atomes comme doués d'élasticité, ou bien on passe à l'autre hypothèse, et alors les atomes sont animés d'une rotation équivalant à l'élasticité ; or, dans l'une ou l'autre supposition, la quantité absolue de force vive se conserve toujours la même dans le système, et lorsqu'elle semble disparaître comme mouvement de translation, elle se convertit en mouvement de rotation ; par conséquent, il n'y a jamais une véritable destruction au point de vue mécanique. De même il n'y a jamais une véritable création de mouvement, bien que l'on pourrait croire le contraire dans certains cas étudiés en mécanique, par exemple dans la rencontre des corps animés de rotation ; après le choc ils présentent quelquefois une vitesse de translation plus grande que celle qu'ils possédaient avant ; mais nous nous sommes entendus sur ce point.

On ne peut nier que malgré la justesse du raisonnement suivi jusqu'à présent, certaines personnes trouveront étranges les paroles suivantes : le mouvement se con-

[1] Tyndal. — Voyez *Cosmos* de Moigno, vol. XXI, p. 275.

serve, alors que l'on voit les corps rester immobiles; à leur avis, il serait plus convenable de dire : c'est la force qui se conserve. Nous ne nous opposons en rien à cette manière de dire, si l'on a soin de prendre pour mesure de la force soit le produit de la masse par la vitesse, soit le produit de la masse par le carré de la vitesse, car cette expression est en même temps celle de l'action mécanique. Toutefois ce langage aurait un inconvénient ; on arriverait à regarder la force comme une sorte d'entité indépendante de la matière, et susceptible de passer d'un corps à l'autre ; en un mot, on arriverait à croire qu'il existe dans les corps quelque principe actif analogue à celui qui, résidant en nous, nous conduit à l'idée de la force. En effet, si l'on examine les choses à fond, on reconnaît que la notion de force ou d'activité extérieure prend naissance dans notre esprit par suite de l'*effort* que nous devons exercer pour mouvoir les corps; cette notion purement subjective nous porte à croire qu'un semblable effort existe dans les corps, de même qu'autrefois on imaginait en eux des principes calorifiques, odorants, sonores, etc.

Pour éclairer cette discussion, il est bon de rappeler une doctrine célèbre due à Galilée : « Dans l'univers physique et sensible il n'y a que matière en mouvement ou en repos. La matière ne peut se concevoir sans figure, grandeur, et changement de continuité. En effet, supposons l'existence d'une matière ou substance corporelle, il faut aussitôt imaginer qu'elle est terminée ; par suite, qu'elle a telle ou telle figure, et que, par rapport aux autres corps, elle est en mouvement ou reste immobile, » etc.

Le physicien de Pise concluait qu'il n'y avait dans les corps ni odeurs, ni saveurs, ni couleurs, mais seulement certains mouvements ou aspects capables de produire en nous ces sensations. Nous pouvons en dire tout autant de la force; et admettre qu'il réside dans les corps une cause qui nous donne la sensation de l'*effort* à faire pour arrêter un

corps en mouvement, ou pour mouvoir celui qui est en repos, et cette cause, nous l'avons déjà vu, n'est autre que la masse elle-même animée de vitesse.

Le sèns donné aux expressions étant bien expliqué, toute controverse cesse d'elle-même; cependant Raukine a cru bien faire en introduisant dans la science une expression spéciale, afin d'éviter les contradictions de mots. Il propose le terme *énergie* pour désigner la moitié du produit Mv^2, nommé ordinairement force vive, ou encore travail, se fondant sur ce que cette valeur est proportionnelle au travail et en donne la mesure. Car, dit-il[1], le mot force étant employé depuis longtemps pour représenter la tendance de deux corps à changer de mouvement relatif, il est inexact d'admettre qu'on puisse appliquer à cette tendance le principe de la conservation indéfinie, puisque le produit des facteurs indiqués plus haut seul reste constant.

Tous les savants n'ont pas encore adopté ce nouveau langage; aussi, de même que l'on est arrivé à employer sans scrupule le mot *chaleur* pour désigner le *calorique*, de même nous emploierons les expressions conservation de force vive et conservation du mouvement comme synonymes.

Du reste, au fur et à mesure que nous étudierons les phénomènes, on reconnaîtra dans chacun des cas spéciaux comment se vérifie le principe de la conservation du mouvement. Ici nous dirons seulement qu'une objection résultant de l'explication incomplète d'un fait particulier ne suffirait pas pour détruire un principe établi sur une longue série d'observations. Il faut dans les sciences faire une distinction entre une *théorie* et une *loi*. La mécanique de la chaleur est encore à l'état de *théorie*, c'est-à-dire qu'elle essaye la synthèse de tous les phénomènes dans lesquels se manifestent à la fois la chaleur et le mouvement, et

[1] Voyez Rankine B. U., *Arch. sc. nat.*, 1859, vol. V, p. 68.

certainement de nombreuses recherches sont encore nécessaires pour donner à cette théorie toute la rigueur d'une loi. Nous préférons cette doctrine à celles qui, pour éviter toute incertitude, arrivent à la négation d'elles-mêmes. En effet, ceux qui admettent les forces, après avoir longtemps disserté sur la nature de ces entités, concluent qu'elle leur est complétement inconnue. Un pareil aveu honore le philosophe lorsque les bases manquent à la spéculation, mais il le rabaisse lorsqu'il est dicté par une interprétation inexacte du langage de la nature.

CHAPITRE VIII

DIGRESSION SUR CERTAINS PHÉNOMÈNES QUI MANIFESTENT LE MOUVEMENT INTÉRIEUR DE LA MATIÈRE ET SON POUVOIR DE DIFFUSION.

Avant de donner des phénomènes causés par le calorique une explication tirée de la théorie ici exposée, il est bon d'examiner sur quelle base expérimentale s'appuie le principe fondamental de l'expansibilité de la matière, et de montrer que cette expansibilité est générale et se manifeste même dans certaines circonstances auxquelles le calorique semble ne prendre aucune part, bien qu'ici encore il soit la cause initiale du phénomène.

Les molécules de la matière sont tellement petites que leurs mouvements échappent à nos sens; ni l'œil armé des microscopes les plus puissants, ni le toucher le plus délicat, ne nous permettent de percevoir les mouvements moléculaires. Toutefois il existe des phénomènes qui, à eux seuls, suffisent pour mettre en évidence une force nommée *répulsive*; car, disait Davy, elle tend à éloigner les molécules dans certaines circonstances où l'action du calorique ne se traduit pas par une élévation sensible de température, tout au moins les effets de cette force ne

sont nullement en rapport avec ceux produits ordinairement par la variation de la température que l'on peut constater.

Notons, par exemple, les effets de la diffusion gazeuse à la température ordinaire. Graham a démontré tout récemment[1] que si un tube terminé à sa partie supérieure par une mince couche de graphite artificiel, et reposant sur la cuve à mercure, est rempli de gaz hydrogène à la pression ordinaire, le gaz s'échappe par les pores du graphite, de sorte que le mercure s'élève dans le tube à une hauteur de plusieurs pouces; pendant que l'hydrogène sort l'air entre, mais en proportion moindre à peu près d'un quart. Si on emploie des gaz moins dissemblables, l'expérience réussit encore, mais les rapports sont changés, et l'échange se fait à parties égales seulement avec les gaz qui ont pour ainsi dire une nature et une mobilité identique. Ce phénomène dépend évidemment de l'expansibilité ou force diffusive propre aux gaz, et comme l'intensité de cette force est variable dans chacun d'eux suivant la vitesse de leurs molécules, de même la facilité avec laquelle ils traversent la lame poreuse n'est pas toujours la même. Cette plus ou moins grande facilité peut être utilisée pour séparer un gaz d'un autre, en le tamisant pour ainsi dire. D'après les expériences de ce genre, l'hydrogène aurait une mobilité 3,74 fois plus grande que l'air et 4 fois plus grande que celle de l'oxygène, valeurs conformes à celles déduites par les physiciens d'autres faits relatifs à la mobilité de ce même gaz.

L'hydrogène, en passant à travers les pores de la matière, peut acquérir une tension relativement considérable. L'intensité de l'infiltration gazeuse s'accroît énormément à mesure que la température s'élève. Dans les expériences de M. Henri Sainte-Claire-Deville, l'hydrogène

[1] Voyez *Comptes rendus*, 27 juillet 1863, t. LXII, p. 181.

traversait les parois d'un tube en acier épais de plusieurs millimètres, porté au rouge, et le courant s'établissait avec une telle énergie, que le gaz se condensait dans un récipient communiquant avec le tube métallique jusqu'à acquérir une tension d'à peu près deux atmosphères.

A la vérité, dans ces conditions, la substance traversée par le gaz exerçait probablement une certaine influence sur le phénomène. Quoi qu'il en soit, les résultats obtenus démontrent combien est grand le pouvoir d'expansion que peut acquérir un gaz par l'effet de la chaleur. A la température ordinaire, les choses se passent de même ; et si le calorique favorise la diffusion gazeuse, cela tient simplement à ce qu'il dilate les pores du corps solide. Au reste, on ne s'étonnera pas de voir l'acier acquérir en s'échauffant une porosité aussi marquée lorsqu'on saura que le fer porté à l'incandescence devient translucide, que le cuivre et un petit nombre de ses alliages, placés dans les mêmes conditions de chaleur, présentent une véritable transparence.

Dans les corps non gazeux ces phénomènes de répulsion sont surtout sensibles à la surface libre, car l'impulsion du mouvement moléculaire n'y étant pas contre-balancée dans tous les sens, les molécules sont facilement projetées hors de la sphère d'action de leurs voisines, dont l'influence ne se fait sentir que d'un seul côté ; enfin, ces actions sont encore plus énergiques à la surface des pointes, les molécules étant alors libres dans plusieurs directions.

Le premier fait qui mérite notre attention est celui de l'évaporation des liquides se produisant même à une température notablement inférieure à celle de l'ébullition, c'est-à-dire du point auquel la tension de leur vapeur surpasse la pression ambiante. Tous les liquides, on le sait, s'évaporent à la température ordinaire, même le mercure le plus fixe d'entre eux, comme le prouve l'expérience des feuilles d'or suspendues dans un flacon

à une certaine distance de la surface d'une couche de ce liquide; en outre, les expériences électriques nous apprennent-elles que le vide barométrique n'est qu'un vide imparfait à cause des vapeurs mercurielles. Cette évaporation n'appartient pas exclusivement aux liquides, mais un grand nombre de solides s'évaporent d'une façon très-sensible, exemple la glace, l'iode, le phosphore, et une foule de substances animales. De même, pour beaucoup de corps regardés comme fixes, la diffusion et la sublimation deviennent sensibles, surtout sous l'influence d'un long espace de temps. Tout le monde connaît les empreintes dites de Moser; on les observe à la surface des corps séparés par une très-petite distance, et elles sont attribuées à une lente volatilisation[1]. La diffusion moléculaire s'accroît énormément si l'on élève la température, ou si l'on communique au corps une certaine tension électrique. Zantedeschi a obtenu des empreintes semblables à celles de Moser : à l'aide de corps réputés fixes, certains oxydes métalliques, par exemple, en les exposant à de hautes températures dans les fours à porcelaine. L'odeur que possèdent quelques métaux, même à froid, prouve leur volatilité. Le nombre des faits de ce genre devient infini si l'on fait intervenir la décharge électrique qui elle-même, comme nous le verrons, est un degré très-élevé des vibrations de la matière. Nous rappellerons seulement que dans un tube de Geissler, les réophores de platine, soumis pendant longtemps à l'action de l'électricité, sont désagrégés, et l'on trouve les parcelles de métal déposées sur les parois du verre. La difficulté d'obtenir un vide parfait dépend surtout de la volatilité des mastics employés pour fermer les jointures. Dans les tubes de Gassiot, le vide s'obtient en remplissant les récipients d'acide carbonique à plusieurs reprises, puis en enlevant la majeure partie du

[1] Bizio, *Dynamique chimique*, t. I.

gaz à l'aide de la machine pneumatique, et enfin en absorbant les dernières traces avec de la potasse caustique, puis le tube est fermé à la lampe; or, une légère élévation de température suffit pour rendre le récipient lumineux et perméable à l'électricité, c'est-à-dire pour produire une diffusion de matière pondérable de la potasse probablement, qui se manifeste par le passage de l'électricité.

La pression mécanique de l'atmosphère et des liquides s'oppose puissamment à la diffusion, mais ne l'arrête pas complétement. Graham a récemment étudié la diffusion des sels, des gommes et du sucre dans les liquides, et a reconnu que, pour être lente, la diffusion de ces corps n'en est pas moins très-énergique; et Bizio avait déjà fait observer depuis longtemps que cette diffusion conduit à admettre une tendance des particules d'un solide ou d'un liquide à pénétrer dans les pores d'un autre, à peu près comme cela arrive pour les gaz.

Lorsque la surface extérieure des liquides est au contact d'un corps solide, on observe certains phénomènes qui n'ont pas leurs équivalents parmi ceux qui se passent à l'intérieur des corps. Telles sont les actions de capillarité; pour expliquer ces faits, il est nécessaire d'admettre une densité différente du liquide dans les couches de la surface, d'où une variation de forme dans la surface libre du liquide.

La force répulsive ou expansive dont nous nous occupons se manifeste tout particulièrement lorsqu'une mince couche liquide se répand à la surface d'une masse fluide. Si une goutte d'une huile fixe ou volatile (telle que l'essence de térébenthine) est versée à la surface de l'eau pure, elle s'étend immédiatement comme un voile léger et d'une extrême ténuité, présentant les vives couleurs irisées des anneaux newtoniens. Mais une de ces gouttes étant ainsi étendue, la couche formée empêche le développement d'une autre. On réussit la même expérience en employant

le sulfure de carbone, quoique son poids spécifique soit plus grand que celui de l'eau. Un semblable phénomène se produit avec le potassium qui, jeté sur le mercure, semble disparaître; mais, si avec la bouche on souffle sur le métal, la vapeur d'eau expirée est décomposée, et la potasse formée apparaît sous forme d'un voile très-mince à la surface du mercure. Toutes les substances fourniraient les mêmes résultats si, lors de leur mélange avec d'autres, on pouvait suivre des yeux les premières couches qui se trouvent en présence.

Une autre classe de faits assez curieux est celle des mouvements présentés par certains liquides lors de leur mélange ou de leur combinaison avec d'autres. Par exemple, on étend une mince couche d'eau sur une lame de cristal épaisse d'environ 2 millimètres; ensuite on laisse tomber sur ce liquide quelques gouttes d'alcool, l'eau sera repoussée immédiatement à une assez grande distance du point sur lequel l'alcool est tombé, puis au niveau de la ligne de séparation des deux liquides, c'est-à-dire là où ils se mélangent, se manifeste une grande agitation, jusqu'à ce que l'eau ait repris sa position première.

Les mouvements de l'acide valérianique versé dans l'eau, ceux du potassium et du camphre brûlant à la surface de l'eau[1], etc., sont connus de tous.

Ces faits, et beaucoup d'autres, dont l'énumération serait superflue, montrent que, au moment de leur réunion, plusieurs substances entrent en mouvement d'une telle façon, que l'on est en droit de supposer leur masse agitée par une force énergique; de pareils mouvements se passent dans l'intérieur de toutes les substances lors d'une combinaison chimique; mais nous ne les voyons pas, tan-

[1] Voyez dans Bizio : *Dynamique chimique*, t. I, p. 31 et suiv. Nous ne citons pas les phénomènes de l'eau à l'état sphéroïdal, car ils sont dus non à l'action d'une forte répulsion, mais à un effet de la vapeur interposée entre le liquide et le métal incandescent.

dis que, dans les cas cités plus haut, se développant à la surface libre, ils sont plus prononcés et nous donnent l'image amplifiée de ceux qui appartiennent absolument aux molécules et qui déterminent leur réunion. D'après l'observation fort juste indiquée par Bizio, les actions chimiques doivent toujours être précédées d'une raréfaction, d'un mouvement, d'une expansion de la matière, et on peut voir dans ses ouvrages une nombreuse collection de faits, desquels il tire les conclusions suivantes : un certain degré de raréfaction de la matière est une préparation indispensable aux actions chimiques pour tous les corps, et cet état particulier de la matière ne saurait être attribué à l'action chimique, comme on l'a cru jusqu'à présent, car l'effet ne peut préexister à la cause.

Dans ces conditions, la diffusion est simplement facilitée et d'une manière indirecte par l'action chimique, cette dernière écartant, supprimant les parties dont la présence continue arrêterait la diffusion ou la sublimation des molécules en formant autour d'elles une espèce d'atmosphère qui empêcherait la désagrégation des molécules restantes.

Les effets de la force diffusive sont d'autant plus marqués que les molécules sont moins fortement soumises à l'influence de leurs voisines ; aussi celles qui se trouvent sur les arêtes ou au sommet des angles solides sont-elles puissamment sollicitées par cette force. On sait combien on facilite la diffusion et l'évaporation des corps en les triturant et en augmentant leur surface ; ces opérations agissent à la façon de la dissolution et de l'action chimique. La même remarque s'applique à la diffusion électrique. Pour expliquer cette force diffusive, il n'est pas besoin de recourir à une action autre que celle à laquelle nous avons attribué la chaleur, et si l'on remarque que l'intensité de ces phénomènes augmente proportionnellement à celle du mouvement calorifique et s'accroît à mesure que les obstacles mécaniques extérieurs deviennent moins nombreux, on

sera bientôt convaincu qu'ils sont dus à une même cause plus ou moins active, selon les conditions de rapport et de liberté propres aux molécules.

Nous parvenons à diminuer considérablement la cohésion des corps, mais ils restent toujours soumis à une force très-puissante, la gravité; il nous est donc impossible de constater expérimentalement une libre manifestation de la force répulsive. On croit, et non sans raison, que cette force répulsive est en pleine activité dans les comètes, car leur masse étant très-faible, l'attraction exercée par les molécules les unes sur les autres doit avoir une intensité fort peu considérable. Dans nos expériences, nous pouvons supprimer les pressions extérieures supportées par les corps, celle de l'atmosphère, par exemple, mais nous ne possédons aucun moyen pour détruire ou même diminuer la gravité; si nous pouvions soustraire les corps à son influence, les phénomènes de répulsion acquerraient une beaucoup plus grande intensité. Or, dans les comètes, ces deux actions font pour ainsi dire complétement défaut; par conséquent, la force répulsive doit s'y trouver développée à un très-haut degré. Les astronomes conviennent maintenant que la gravitation seule ne permet pas de rendre compte des formes présentées par les comètes et qu'il est nécessaire d'admettre l'intervention d'une composante répulsive dépendant de la chaleur et de la grande distance du soleil. Quelques expériences de M. Faye semblent appuyer cette hypothèse: ainsi il a vu l'arc voltaïque jaillissant dans le vide être brusquement repoussé par un corps chaud. En outre, les progrès récents de la spectroscopie démontrent que les comètes ont une lumière propre. Cette lumière suppose une énergie moléculaire analogue à celle des nébuleuses, de laquelle elle se rapproche beaucoup et par le degré de réfrangibilité et par la couleur : circonstances que ne saurait expliquer la force répulsive connue sous le nom de

chaleur. Ce pouvoir répulsif paraît avoir une action variable et spéciale dans les différentes comètes, et on ne peut le représenter simplement par un facteur de signe contraire à celui qui désigne l'attraction solaire. La pluralité des queues des comètes, la rapidité de leur formation, et surtout le mouvement très-évident des jets lumineux qui, d'abord dirigés vers le soleil, se tournent ensuite à l'opposite, et semblent repoussés par lui, toutes ces particularités montrent un genre d'action spécial, et le seul phénomène analogue que l'on pourrait citer est la répulsion exercée par un corps chaud sur le flux électrique[1].

Pour dilater et diffuser la matière d'une comète, la chaleur du soleil suffit; mais, dans nos laboratoires, il faut combiner les moyens d'action. Nous devons d'abord supprimer la pression atmosphérique dans nos récipients, puis triompher de la gravité et de la cohésion en excitant fortement l'expansion de la matière à l'aide de l'électricité. Les explications précédentes nous paraissent assez rationnelles, d'autant mieux que tous ceux qui ont observé les phénomènes lumineux produits dans le vide ont noté constamment l'analogie de ces jets de lumière avec ceux des comètes.

On pourrait encore entrer plus avant dans le domaine des hypothèses, et appliquer à cette force répulsive la magnifique théorie de l'atténuation de la matière, déjà abordée par Newton dans les questions ajoutées à son optique[2], et qui a été reprise dans ces derniers temps par des savants italiens. En considérant le calorique comme

[1] Voyez les figures de la comète de juillet 1861, dans le *Bulletin du Collége Romain*, 1re année, n° 19 : le retrait des jets lumineux est manifeste, et on en suit les progrès d'une nuit à l'autre; les variations étaient même sensibles à quelques heures d'intervalle. Disons toutefois que le rebroussement des jets pourrait être seulement apparent, ces courbes n'étant que les lignes suivant lesquelles se disposent les molécules libres et sorties de la sphère attractive du noyau.

[2] Newton, *Optique*, question 22, p. 319 et 320. Édit. cit.

un mouvement qui anime la matière, nous expliquerons pourquoi, par l'influence de cette agitation intérieure, les groupes moléculaires, fortement cohérents dans les solides, se séparent les uns des autres et acquièrent la mobilité des liquides. Ces liquides laissent échapper continuellement des vapeurs, même aux plus basses températures; les solides, eux aussi, se vaporisent, car si dans ces corps la force expansive n'est pas suffisante pour surmonter complétement les pressions exercées par les atmosphères ambiantes, cependant leurs molécules se frayent peu à peu une route à travers les interstices de ces milieux. En exagérant le mouvement moléculaire, soit par une élévation de température, soit à l'aide de l'électricité, on réussit à détruire les combinaisons des corps élémentaires, sans même avoir recours à l'action auxiliaire d'un corps étranger pour déterminer la décomposition. Le dernier pas à franchir serait d'obtenir, par l'exaltation de la vibration des atomes constitutifs, la dissociation des groupes formant les molécules des corps dits élémentaires. Alors que deviendrait la matière? Présenterait-elle encore les qualités de la matière pondérable? Newton pensait qu'elle serait transformée en la substance très-subtile qui constitue le feu et la lumière, et nous nous dirons « qu'elle *serait transformée en cette substance que nous nommons éther impondérable*[1]. » Le célèbre chimiste, M. Chevreul, fait remarquer que les quatre éléments des anciens : terre, eau, air et feu, équivalent aux quatre états sous lesquels on peut concevoir la matière, le solide, le liquide, le gazeux et l'éthéré; ce dernier étant considéré comme le terme le plus avancé de la désagrégation de la matière par l'action calorifique.

[1] Après la publication de la première édition de ce livre faite en langue italienne, plusieurs auteurs ont regardé le dernier atome élémentaire isolé comme étant la molécule d'éther, et ont introduit le symbole *m* pour représenter la molécule pondérable, la molécule impondérable étant figurée par un *p*, admettant que les *m* peuvent se résoudre en *p*.

Nous n'anticiperons pas ici sur ce que nous devons dire et développer plus loin, et nous terminerons cette discussion préparatoire sur les forces répulsives par les remarques suivantes : 1° En s'arrêtant au simple témoignage des faits, l'état primitif et naturel de la matière ne semble pas être l'état solide dans lequel il y a cohésion et liaison des molécules, mais au contraire celui dans lequel tous les atomes sont dans une liberté et une indépendance réciproques absolues[1]; 2° les états dans lesquels les molécules sont liées les unes aux autres appartiennent plutôt à une formation plus avancée, et les forces imaginées pour les expliquer peuvent être regardées comme des effets indirects du mouvement propre à la matière.

Nous exposerons plus loin comment on peut expliquer ce résultat. Pour le moment, continuons à expliquer les phénomènes calorifiques dans l'hypothèse de la chaleur considérée comme force mécanique.

CHAPITRE IX

APPLICATION DE LA THÉORIE PRÉCÉDENTE A L'EXPLICATION DES FAITS PRINCIPAUX RELATIFS A LA FUSION ET A LA VAPORISATION DU ZÉRO ABSOLU DE TEMPÉRATURE.

Dans les chapitres 6 et 7, nous avons exposé la manière de concevoir les différents états des corps ; nous devons examiner à présent comment on peut expliquer dans cette théorie les phénomènes qui accompagnent le passage d'un corps d'un de ces états à un autre :

1° Le fait du calorique latent, c'est-à-dire du calorique absorbé ou dégagé lors d'un changement d'état (voy. ch. I, 4e loi) ;

[1] La substance des nébuleuses est très-certainement gazeuse, car le spectre de ces corps lumineux présente un fort petit nombre de raies et s'il est une matière qui puisse être dite à l'état élémentaire c'est assurément celle-là.

2° La variation de la capacité calorifique des substances pendant ces mêmes changements.

Indiquons rapidement les faits dont il nous faut donner l'explication.

Lorsqu'on soumet à l'action de la chaleur un corps liquide, une masse d'eau, par exemple : 1° il se produit un travail de *dilatation* consistant en une augmentation de volume. Cette dilatation, pour se faire, exige que les résistances intérieures soient vaincues ; par conséquent, outre la chaleur nécessaire pour *élever la température* du corps, il en faut une certaine quantité pour suffire à ce travail intérieur. La dose de chaleur consommée pendant la dilatation est nommée *calorique spécifique*. Ce nombre est donc la somme de deux quantités de chaleur : l'une qui échauffe, l'autre qui travaille. 2° La chaleur continuant à agir, à partir d'un certain degré, la température de la substance chauffée cesse de s'accroître, et le volume d'augmenter; toute la chaleur fournie au liquide est employée à le transformer en vapeur, c'est-à-dire à surmonter les pressions intérieures dues à la cohésion des molécules liquides, et la pression extérieure, si la vapeur est libre de se dilater. Toute vaporisation comprend trois opérations : (*a*) il faut chauffer la masse à un degré voulu ; (*b*) vaincre la résistance moléculaire intérieure; (*c*) dilater le liquide et en écarter les molécules à un degré nécessaire pour le transformer en vapeur.

D'après notre théorie, le mouvement des molécules du corps présentera donc trois phases bien distinctes :

(*a*) La vibration moléculaire acquiert une intensité déterminée ; (*b*) les pressions intérieures (dites forces moléculaires) sont vaincues; (*c*) les molécules sont lancées avec une vitesse telle, qu'elles deviennent plus ou moins indépendantes.

Évidemment ce dernier travail absorbera à lui seul une force vive énorme; aussi, pour gazéifier une masse liquide,

il faut une quantité de chaleur supérieure de beaucoup à celle qui en produit la simple dilatation; cette quantité est nommée *calorique de vaporisation*.

La masse liquide étant réduite à l'état de vapeur, si on lui fournit une nouvelle quantité de chaleur, elle sera tout entière employée à dilater la vapeur produite et à en élever la température, nous supposons, bien entendu, les molécules libres de toute influence moléculaire, comme cela se présente dans les gaz parfaits. Mais évidemment, pour échauffer le corps pris à l'état aériforme, il ne faudra pas la même quantité de travail que s'il était liquide; les molécules n'étant plus gênées par leurs voisines, le calorique nécessaire à la dilatation diminuera. Donc, pour élever une masse égale d'une substance donnée, il ne faudra pas le même nombre de calories suivant son état liquide ou gazeux.

Lorsqu'un corps passe de l'état de fluide élastique à celui de liquide, le même cycle des opérations s'accomplit en sens inverse.

Considérons un gaz très-rapproché de son point de liquéfaction, une vapeur, je suppose; ce corps, abandonnant l'état gazeux, ses molécules doivent perdre leur vitesse de libre translation, afin d'accomplir leur mouvement dans les orbites étroites qui, nous l'avons dit, sont les trajectoires des atomes liquides. Pour se réaliser, un semblable effet exige la soustraction d'une certaine quantité de la force vive de projection renfermée dans la masse, afin que les molécules restent exclusivement animées du mouvement vibratoire. Dans la réalité, cette déperdition se produit peu à peu, et seulement un certain nombre de molécules à la fois abandonnent leur vitesse de projection. De la force devenue ainsi disponible, une partie échauffe les corps environnants, une autre est employé par la portion du gaz encore libre pour résister à la liquéfaction; de sorte que ces deux quantités dynamiques ra-

niment le mouvement vibratoire de la masse ambiante, affaibli par les influences extérieures. Soit le cas particulier de la condensation de la vapeur aqueuse au sein d'un liquide froid, le mouvement perdu par le corps gazeux se communique à un certain poids de liquide et l'échauffe; on a même fondé là-dessus un mode de chauffage utilisé par l'industrie; au contraire, le mouvement peut se répandre lentement dans les corps voisins, dont il élève la température ou tout au moins il en empêche le refroidissement.

De même une certaine quantité de vapeur d'eau répandue dans l'atmosphère vient-elle à se condenser en gouttelettes, elle forme un nuage et dégage de la chaleur; une partie de sa force vive est employée à échauffer l'air sous-jacent, et une autre à maintenir sous forme de gaz la masse de vapeur restante. En un mot, nous avons dans ces circonstances transformation d'un libre mouvement de translation d'une partie du corps en mouvement vibratoire de l'autre.

Les groupes moléculaires de la substance ayant perdu leur vitesse de translation et se trouvant réduits à vibrer suivant des courbes très-resserrées, évidemment, pour obtenir de leur part le même choc sur les molécules voisines, il faudra leur communiquer une force vive supérieure à celle qui auparavant était suffisante, car la même force vive ne produira plus une vibration d'une aussi grande intensité, et, de plus, la dépense de force variera dans des limites assez étendues, car la distance parcourue par les molécules et le nombre des chocs qu'elles exercent contre leurs voisines changent avec la nature et l'état des corps. Il y aura donc nécessairement des différences dans les effets produits par une même quantité de mouvement extérieur communiquée à une masse de matière selon l'état physique sous lequel elle se présentera.

La quantité de mouvement qui, dans un gaz, produit un certain déplacement linéaire des molécules, et, par suite, un redoublement d'intensité dans leurs chocs réciproques, ne produirait pas le même effet si le corps était liquide, car les molécules, dans ce dernier, étant cernées par leurs voisines, les collisions sont plus fréquentes; par suite, il faudra des quantités différentes de force vive dans les deux cas pour obtenir dans une substance donnée un même accroissement des vibrations thermiques, c'est-à-dire de la température; autrement dit, *la capacité calorifique d'un corps change avec l'état du corps.* Cette déduction est justifiée par l'expérience, car on a reconnu que dans tous les corps liquides les chaleurs de températnre sont plus grandes qu'elles ne le sont pour les mêmes corps à l'état gazeux. La capacité calorifique de l'eau à l'état liquide est 1; à l'état de vapeur, elle est égale à 0,475, et il en est de même des autres corps [1]; de sorte que, à très-peu près, la capacité des fluides réduits à l'état gazeux serait généralement la moitié de celle qu'ils présentent à l'état liquide. Ce résultat doit être accepté sans tenir compte des actions secondaires possibles, telles que les variations des mouvements de vibration, l'influence des milieux environnants, les forces moléculaires, toutes conditions qui certainement influent sur la capacité calorifique comme nous le verrons, mais dont nous pouvons pour le moment faire abstraction.

On comprendra encore mieux les considérations précédentes en examinant le cas inverse, c'est-à-dire le passage d'un liquide à l'état de gaz; alors il faut développer dans les molécules une vitesse de projection assez énergique pour leur permettre d'abandonner la sphère d'activité des molécules voisines, et la quantité de mouvement à fournir dans ce cas doit être suffisante pour : (a) séparer les molé-

[1] Voyez Cantoni, p. 73 de la brochure : *Relations entre certaines propriétés thermiques et d'autres propriétés physiques.* Pavie, 1862, mémoire inséré également dans le *Nuovo Cimento*, année 1862.

cules de celles qui les environnent et leur frayer une route au travers de celles-ci, (*b*) pour maintenir ces mêmes molécules en mouvement.

Ce changement d'état peut se faire dans deux conditions différentes: dans le premier cas le corps ne reçoit de l'extérieur aucune nouvelle quantité de calorique; dans le second il en reçoit.

1° Premier cas : pendant l'évaporation d'une partie du liquide, celle-ci devra recevoir de la portion restante, ou des corps environnants la quantité de mouvement afférente à son nouvel état; par conséquent, elle absorbera de la chaleur à tous les corps voisins, la masse liquide non vaporisée y comprise. Tel est le cas ordinaire de l'évaporation des liquides à la température ordinaire, aussi elle s'accompagne toujours d'un abaissement de température, et même sur ce principe on a fondé la construction du psychromètre des météorologistes. Les phénomènes sont beaucoup plus marqués avec les liquides très-volatils, tels que ceux résultant de la condensation de corps ordinairement gazeux, mais susceptibles de se liquéfier sous l'influence combinée d'une forte pression et d'un abaissement considérable de température (ex. : acide sulfureux, acide carbonique, protoxyde d'azote, etc.); alors si la pression diminue, ils reprennent l'état aériforme et absorbent une quantité de chaleur telle, que les physiciens emploient ces liquides pour obtenir de très-grands froids; avec l'acide carbonique liquéfié, la température descend à — 70° et même à — 100°. La soustraction du calorique se fait avec une telle rapidité que l'on peut congeler l'eau dans un creuset de platine incandescent, au moyen de l'acide sulfureux liquide, et elle est assez intense pour que, lors de l'évaporation de l'acide carbonique liquéfié, une partie du liquide se solidifie (Thilorier). Les phénomènes s'expliquent facilement, car par hypothèse la force vive restant constante dans la masse encore liquide et dans celle en voie de gazéification, comme

les molécules de cette dernière doivent acquérir une vitesse extrême (car le volume devient au moins 400 fois plus grand), il faut bien que l'autre partie subisse une perte correspondante, rien d'étonnant alors à ce qu'elle se solidifie. L'énorme pression exercée par la quantité de liquide, reprenant l'état gazeux sur celle qui demeure dans son état primitif, peut aussi favoriser la solidification de celle-ci ; en effet, cette pression, malgré sa très-courte durée, doit, par un véritable effet mécanique, produire un rapprochement des molécules du liquide restant.

2° Dans le second cas, si on augmente la quantité de chaleur renfermée dans une masse liquide, lorsqu'elle a atteint le point d'ébullition, c'est-à-dire la température à laquelle la tension de la vapeur égale celle de l'atmosphère ambiante, l'addition d'une nouvelle quantité de chaleur ne déterminera pas un accroissement de température, le supplément de force fourni aux molécules sera employé ni à augmenter leur collision réciproque, ni à dilater la masse liquide, mais à communiquer un mouvement de projection et une vitesse suffisante aux atomes de la masse liquide qui se transforme en gaz ou en vapeur[1]. Dire que le liquide se vaporise, c'est admettre implicitement qu'il existe un espace dans lequel les molécules peuvent se dégager. Si cet espace manquait, la température s'élèverait indéfiniment le corps conservant toujours l'état liquide.

Lors du changement d'état dont nous nous occupons, on observe un fait fort remarquable et qui, à première vue, semble paradoxal et contraire à la théorie de la chaleur établie par Clausius et Tompson. Voici ce fait : un corps froid peut céder de la chaleur à un autre plus chaud que lui. En effet, la portion qui se vaporise possède dans le principe une certaine quantité de force vive qui à l'instant de

[1] Nous disons gaz ou vapeur, car il n'y a aucune différence réelle entre ces deux états, si ce n'est que les vapeurs sont des gaz dont le point de liquéfaction est peu élevé, et inversement pour le gaz.

la volatilisation s'accroît considérablement aux dépens de la masse restée liquide et alors celle-ci plus froide que la première lui abandonne cependant une certaine quantité de chaleur. De même la température d'un corps froid peut s'élever par l'action d'une substance encore plus froide. Nous citerons un exemple : Une masse d'eau étant refroidie à — 5°, je suppose, si on la touche avec un corps à — 2°, elle se congèle en partie et toute la masse remonte à 0°. Ainsi un corps froid, lors de son changement d'état, peut céder de la chaleur à un autre plus chaud que lui. En présence de ce fait, on nous adrssera peut-être l'objection suivante : Si la température dépend de la vitesse propre aux molécules, comment se peut-il qu'une molécule douée d'une moindre vitesse en communique une plus grande à une autre? — La réponse est simple, lorsqu'on suppose les molécules animées d'un double mouvement de rotation et de translation, car les vitesses de rotation peuvent, nous le savons, se transformer en vitesses de translation, et, à la suite d'un choc, un mobile peut rebondir avec une vitesse supérieure à celle qu'il avait auparavant.

Dans l'hypothèse de molécules simplement élastiques, on a essayé d'expliquer le phénomène dont il vient d'être question ; mais alors, comme la molécule exerçant le choc communique à celle qui l'éprouve une vitesse supérieure à la sienne, on suppose à la première une masse plus grande que celle de la seconde, et cette hypothèse n'est pas toujours admissible. Donc on est loin de pouvoir tout expliquer en supposant, comme on le fait ordinairement, les molécules douées seulement d'élasticité, tandis que la théorie adoptée par nous est beaucoup plus générale. Les molécules, spécialement celles des liquides et des solides possèdent certainement une énorme vitesse de rotation ; et la force vive, ou le travail, est *emmagasiné* dans ces molécules. A l'occasion d'un choc convenable, cette force vive pourra se transformer en mouvement de translation

et restituer le travail, jusque-là tenu en réserve ; en un mot nous dirons de la rotation moléculaire ce que l'on a dit de l'inertie : son action est comparable à celle d'un volant, elle sert à emmagasiner la force ou le mouvement (voyez plus haut, page 13).

Non-seulement la pression extérieure, mais encore diverses influences étrangères font varier le point d'ébullition d'un liquide; parmi les plus importantes on peut citer le contact des corps solides; en effet, sur les surfaces mises en rapport avec les liquides se rencontrent toujours quelques bulles d'air adhérentes représentant de petits intervalles libres, qui favorisent le dégagement des molécules; de plus, ces surfaces par leurs rugosités plus ou moins prononcées agissent comme une force répulsive d'intensité variable. Aussi a-t-on reconnu que de petites masses d'eau, mises en suspension dans un liquide de même densité, pouvaient être portées à une haute température sans se volatiliser ; mais, si on rompt cet état d'équilibre forcé par un moyen quelconque, le contact d'un fil métallique, je suppose, elles produisent une vigoureuse explosion, et leur température s'abaisse aussitôt. (Dufour.)

Donc, en augmentant la quantité de chaleur d'un liquide, on ne le vaporise pas si la diffusion de ses molécules est empêchée, et au contraire la température ne s'élève pas si la vapeur peut se former librement.

En résumé, dans tous les gaz on doit considérer deux quantités de chaleur, une, qui détermine son degré de tension, peut être nommée calorique *d'élasticité;* l'autre est celle qui a été nécessaire pour séparer les molécules liquides, c'est le calorique de *vaporisation.*

En employant la vapeur comme puissance mécanique, évidemment on utilise seulement la première quantité, c'est-à-dire environ $\frac{1}{12}$ de la chaleur totale ; la seconde constitue une perte réelle, puisque pour obtenir un travail, il faut condenser la vapeur et alors la chaleur de vaporisation rede-

vient libre tout entière. Pour éviter cet inconvénient, on a imaginé les machines à air chaud, dans lesquelles on fait intervenir exclusivement la chaleur de dilatation, mais les praticiens ont reconnu que ces machines étaient inférieures aux autres sous plusieurs rapports.

Actuellement il est bon d'examiner avec attention le cas d'une masse liquide arrivée à l'état de libre expansion, c'est-à-dire réduite en gaz et de rechercher quels seront les effets obtenus en augmentant la force vive qu'elle possède. D'abord on observera un travail intérieur dont l'effet sera un accroissement de volume; en second lieu, l'intensité des vibrations moléculaires deviendra plus grande et la température s'élèvera. De ces deux effets le second peut manquer ; supposons, en effet, le cas où tout le calorique est employé à produire un travail de simple dilatation ; c'est-à-dire, pour employer l'expression reçue, à empêcher le refroidissement que produirait dans la masse entière une dilatation forcée, telle que celle d'un gaz enfermé dans un cylindre muni d'un piston, lorsqu'on vient à soulever ce piston. Au contraire l'augmentation de volume peut manquer, et cela arrive si le gaz est contenu dans un récipient inextensible. Dans ce dernier cas, l'addition d'une certaine quantité de mouvement produira dans l'intensité du choc moléculaire un accroissement supérieur à celui que l'on aurait obtenu dans le premier avec la même dépense calorifique.

Les considérations précédentes nous conduisent à une importante division de la capacité des gaz pour la chaleur. On doit distinguer la capacité à *volume constant* et la capacité à *pression constante;* en d'autres termes, si pour obtenir une certaine variation thermométrique il a fallu donner une quantité de chaleur déterminée à une masse gazeuse renfermée dans un récipient de volume constant; cette même masse absorbera une quantité de chaleur notablement différente lorsque son volume pourra changer ; car

alors elle devra faire un travail supplémentaire pour dilater sa propre masse. La capacité à pression constante et par suite à volume variable a été trouvée par voie d'expérience $c = 0,2377$, et comme le rapport entre les deux capacités est $\varkappa = 1,4122$, il en résulte que la capacité à volume constant $c' = 0,1687$ [1]. Évidemment la différence de ces deux capacités est fonction du travail mécanique accompli; et si, partant de ce chiffre, on calcule l'équivalent mécanique de la chaleur, on trouve le nombre 424 kilogrammètres, résultat conforme à ceux obtenus par d'autres méthodes, de sorte que l'on a ainsi une éclatante confirmation de la théorie.

En posant $\frac{c}{c'} = \frac{1}{440}$ = environ $\frac{5}{7}$, on voit que dans la dilatation d'un gaz sous une pression constante, les $\frac{2}{7}$ environ de la force vive sont employés à produire simplement le travail de projection des molécules, sans qu'il en résulte le moindre accroissement d'intensité dans la vibration moléculaire; par suite, lors de la contraction du gaz, cette force deviendra disponible. Ainsi, lorsque les molécules d'abord complétement libres dans un grand espace seront forcées à exécuter leurs mouvements dans un moindre volume, leur vitesse de translation deviendra sensible; elles se choqueront mutuellement, elles feront effort contre les corps environnants et produiront un travail ayant pour résultat un accroissement de la vibration calorifique. En un mot, elles agiront comme des projectiles qui, animés dans l'origine d'une grande vitesse, l'épuisent peu en communiquant un ébranlement, au milieu traversé et aux parois qui le limitent. Dans le langage usité jusqu'à présent par les physiciens, on a coutume de dire : dans toute dilatation gazeuse une certaine quantité de chaleur *devient latente*, et cette

[1] Hirn, p. 171, trad. de Zeuner. On a donné de ces faits une démonstration fondée sur des raisonnements mathématiques élémentaires.

quantité redevient *sensible*, lors de la condensation. Or, on se représente difficilement la chaleur comme une matière qui tantôt se dissimule dans les pores d'une substance pour en sortir brusquement, à la manière de l'eau dans une éponge. Toutefois l'expression de calorique latent peut être conservée, mais seulement comme une locution commode pour la rapidité du discours[1].

[1] Ici il ne sera pas hors de propos de citer une belle application de ces principes faite par M. Marsh à la théorie des étoiles filantes (voyez *Americ. Journal*, vol. XXX, On luminosity of meteors).

L'inflammation de ces corps est certainement due à leur frottement contre l'air ; et cependant la très-grande raréfaction de l'atmosphère dans les hautes régions semble repousser l'idée d'un dégagement de chaleur assez considérable pour volatiliser ces substances et les porter à l'incandescence. Ce physicien fait remarquer avec raison que cet air dilaté doit posséder une énorme quantité de chaleur latente absorbée pendant sa dilatation. En effet, du rapport entre les capacités calorifiques cité plus haut, il résulte que si l'air est libre de se dilater, les $\frac{5}{7}$ environ de la chaleur qui lui est fournie sont employés à élever sa température, et les $\frac{2}{7}$ restant sont absorbés par le travail mécanique de la dilatation, de sorte que des 273 degrés thermométriques nécessaires pour doubler le volume d'une masse d'air, 80 degrés absorbés pour ce travail sont, comme l'on dit, rendus latents. Or, à une hauteur de $6^{\text{kilom}},38$, l'air est déjà réduit à la moitié de sa densité ; par conséquent, il aura 80 degrés de chaleur latente, et on trouve par le calcul que si la densité devient 128 fois moindre, et cela arrive à 21 milles, la chaleur latente devient égale à 10000 degrés. Cette quantité de chaleur est nécessairement dégagée lors de la compression exercée sur le gaz par le bolide au moment où, traversant l'atmosphère avec une grande vitesse, il fait subir une énorme condensation aux couches situées sur son trajet. Supposant qu'alors la densité du gaz devienne seulement égale à celle de l'air au niveau de la mer, on voit que lumière et chaleur pourront se développer en grande quantité.

A la hauteur de $111^{\text{kilom}},6$, l'air est 260000 fois plus rare, et le calorique latent de 20 millions de degrés, si bien que, même en admettant pour les limites de l'atmosphère une température de -100°, et malgré la quantité de chaleur absorbée par le corps qui rencontre notre atmosphère, une température aussi élevée doit être capable d'en volatiliser des masses considérables. La quantité de calorique contenue dans l'air étant d'autant plus grande que l'air est plus dilaté, on s'explique alors pourquoi dans les hautes régions les inflammations des bolides sont plus fréquentes que dans les couches situées plus bas. Nos observations nous ont fourni le nombre 150 kilom. pour

On se demandera peut-être si les forces moléculaires sont exactement détruites dans les gaz. Dans ce cas, les lois de Mariotte et de Gay-Lussac doivent être rigoureusement exactes, et, dans le calcul de la tension finale d'une masse gazeuse, on peut négliger le travail interne. Or, les délicates investigations de M. Regnault et d'autres physiciens ont mis en évidence les écarts de ces deux lois. Il a été reconnu que les coefficients de dilatation varient avec les températures; mais que, pratiquement parlant, on peut les regarder comme constants pour l'hydrogène, l'azote et l'oxygène, gaz considérés comme parfaits, au moins dans les limites de nos procédés d'observation. Par suite, l'expérience des deux ballons communiquants, faite par Joule, fournit des résultats conformes à la théorie seulement avec les gaz parfaits; car, en employant l'acide carbonique ou d'autres gaz non permanents, on constate réellement une différence finale de température dans le système, comme cela doit arriver toutes les fois qu'une réaction intérieure prend naissance.

Les gaz nommés permanents ne sont que de simples vapeurs éloignées de leur point de saturation, ou encore des vapeurs surchauffées. Pour ces gaz, dans le cas où ils sont parfaits, la capacité calorifique entendue, comme on le fait ordinairement, équivaut à la capacité *réelle* ou *absolue*, car le travail intérieur est nul dans un de ces gaz chauffé sous une pression constante.

Considérant la dilatation des gaz permanents comme la mesure de la force vive dont sont animées leurs molécules, on peut dire que si leur force expansive devient nulle, il

la hauteur moyenne de ces météores; par suite, la quantité de chaleur latente équivaut à plusieurs millions de degrés. En outre, d'après les calculs de M. Schiapenelli, l'air serait rencontré par les météores avec une vitesse comprise entre 16 kilomètres par seconde au moins et 79 kilomètres au plus.

en sera de même du mouvement moléculaire, et alors on aura le zéro thermométrique absolu. Or il résulte des expériences de Magnus et de Regnault que la dilatation des gaz parfaits est 0,003665 de leur volume pour chaque degré centigrade, d'où l'on déduit que si un gaz est abaissé à — 273°, sa tension sera réduite à zéro, et on aura par conséquent le zéro thermométrique absolu[1]. Mais si on réalisait ces conditions, avant d'arriver à une aussi basse température, les gaz changeraient d'état, et, par suite, de capacité calorifique. On ne peut donc parfaitement fixer la température à laquelle cesserait tout mouvement vibratoire. Du reste, on est loin de pouvoir produire un froid de — 273°, et à ce propos il est bon de remarquer comment l'augmentation du mouvement intérieur des corps nous est plus facile à obtenir que sa diminution. Nous ajouterons, avec M. Hirn, que, suivant les principes admis anciennement, le volume d'un corps devrait se réduire à zéro par l'effet d'une soustraction continue du calorique, c'est-à-dire que la matière d'un corps pourrait disparaître complétement, ce qui est absurde.

Posons $\alpha =$ le cofficient de dilatation d'un corps pour un degré centigrade, le volume du corps sera toujours exprimé par

$$V_1 = V_0 \frac{1+\alpha t_1}{1+\alpha t_0}$$

t et t_0 étant les températures en degrés centigrades. Si t_0 représente le zéro de notre thermomètre et si on donne à α sa valeur maximum, c'est-à-dire le coefficient de la substance la plus dilatable, soit

$$\alpha = 0,00015 = \frac{1}{6666}$$

[1] En effet, en divisant le volume considéré comme unité par 0,003665, on a sensiblement 273 pour quotient.

en supposant t_1= le degré du zéro absolu, t=273°, la formule devient

$$V_1=V_0\left(1-\frac{273}{6666}\right)=0,959V_0$$

Autrement dit, les corps, à la température de zéro absolu, occuperont un espace inférieur de 0,04 environ à celui qu'ils présentent à la température de la glace fondante.

CHAPITRE X

DU PASSAGE DE L'ÉTAT SOLIDE A L'ÉTAT LIQUIDE, ET RÉCIPROQUEMENT. — INTENSITÉ DES ACTIONS MOLÉCULAIRES COMPARÉE A CELLE DE LA GRAVITÉ

Arrivons maintenant à l'examen de la fusion et de la solidification, et nous allons trouver à faire les mêmes observations que précédemment. Pendant l'évaporation des liquides, avons-nous dit, on a à rompre les liens qui retiennent les particules matérielles les unes près des autres, liens moléculaires théoriquement comparables à des pressions extérieures. La même chose doit arriver lors du passage d'un solide à l'état liquide. Dans ses calculs, le géomètre se contente de représenter toutes ces résistances par un symbole unique; mais le physicien doit aller plus loin, il doit chercher à prendre du phénomène une connaissance plus complète.

Entre une substance à l'état solide et la même substance à l'état liquide, d'après la théorie ici exposée, existent les différences suivantes : (*a*) un plus grand rapprochement des parties, (*b*) un mouvement synchrone des diverses molécules constituant un système oscillant comme un atome unique, (*c*) une orientation dans les axes de ro-

tation, (*d*) une adhérence spéciale aux atomes réunis dans un même élément cristallin de la substance.

a. En effet, on peut poser comme règle générale que les solides ont une densité supérieure à celle des liquides. Il faut excepter seulement les substances très-peu nombreuses qui se dilatent à l'instant de leur solidification, exemple : l'eau, le bismuth, et dans ce cas, selon toute probabilité, les petits espaces intermoléculaires se resserrent pour former des pores plus larges entre les lames cristallines, pores qui, dans certains cas, sont visibles à l'œil nu.

b. L'orientation moléculaire est rendue évidente par les formes cristallines que revêtent tous les solides obtenus à un état de pureté suffisante. Certaines substances ne nous apparaissent pas sous forme de cristaux lorsqu'elles sont en grandes masses; elles sont nommées amorphes ou vitreuses; néanmoins elles ont une structure régulière qui les rapproche des cristaux, au moins pour leurs dernières particules. Le verre ordinaire lui-même n'est pas dépourvu de toute structure cristalline, comme on peut le reconnaître avec l'acide fluorhydrique.

c. Le synchronisme vibratoire d'un certain nombre de molécules est une conséquence forcée de la réunion de plusieurs d'entre elles dans une même sphère d'activité pour former la molécule du solide, véritable rudiment du cristal, et cette condition moléculaire nous paraît évidente, d'après l'action des corps solides sur la lumière ; en effet, quelques-uns sont incapables de transmettre les ondes d'une certaine longueur, précisément à cause du défaut de synchronisme entre ces mouvements et les vibrations propres aux molécules. L'existence du rhythme vibratoire des particules solides nous semble indiquée en outre : 1° par les phénomènes magnétiques; 2° par les différentes raies colorées du spectre lumineux fourni par les corps lorsqu'ils entrent en combinaison à une température élevée; 3° par les propriétés particulières aux corps isomorphes.

d. Mais le travail principal à accomplir dans la fusion a pour objet la rupture des liens moléculaires, car ils représentent toujours une résistance à vaincre, quelle que soit du reste leur nature, qu'ils aient pour origine certaines forces agissant réellement de molécule à molécule, qu'ils résultent au contraire de la pression exercée par un milieu extérieur.

Un solide ne pourra donc se liquéfier si ses molécules ne reçoivent pas une quantité de mouvement suffisante pour : 1° éloigner leurs centres; 2° rompre les groupes oscillant d'une façon synchrone; 3° désorienter les axes; 4° surmonter la cohésion. Par conséquent, pendant sa fusion, un solide, afin d'accomplir ces divers travaux, absorbera du calorique, c'est-à-dire exigera l'apport d'une nouvelle quantité de mouvement intérieur, et il ne pourra changer d'état si cette quantité ne lui est pas fournie par des sources étrangères. Ce calorique servira tout entier à donner à un certain nombre de molécules les impulsions nécessaires pour briser leurs liens, et nullement à accroître les vibrations de la masse restante. Aussi la température restera-t-elle stationnaire durant la fusion. Le travail accompli par la force surajoutée sera précisément la destruction des liens moléculaires.

Réciproquement, lors de la solidification d'un liquide, il faudra lui enlever toute la quantité de mouvement dont nous venons de parler; de telle sorte que si par un artifice particulier le corps est maintenu liquide à une température inférieure au point de solidification, comme cela arrive pour les masses d'eau maintenues dans une immobilité absolue, ou encore mises en suspension dans un liquide d'une densité égale à la leur (dans ces conditions, d'après les expériences de Dufour, on peut notablement abaisser la température de l'eau au-dessous de zéro), lors de la congélation, la partie qui se solidifie cède de la chaleur à celle qui reste liquide : en d'autres

termes, la vitesse perdue par les molécules de la portion solidifiée se communique aux autres, et le tout remonte à la température normale de la fusion. Cette propriété n'appartient pas exclusivement à l'eau, mais on la retrouve dans quelques autres liquides, dans certains métaux, le plomb et l'étain, par exemple, et même dans les alliages susceptibles de rester liquides au-dessous du point de fusion. Le dégagement de chaleur est parfois très-considérable; ainsi l'acide vanadique s'enflamme, la zircone fait de même, et l'acide arsénieux produit des étincelles. On observe donc ici un nouvel exemple d'un corps froid cédant de la chaleur à un autre plus chaud, circonstance déjà signalée lors de l'étude des gaz; ce phénomène n'est nullement contraire aux lois de la physique sur l'équilibre de température, car celles-ci ne comprennent pas les cas où il y a changement d'état des corps. En voyant l'eau rester liquide au-dessous de zéro, à la condition d'être maintenue parfaitement immobile, et se congeler par la plus légère agitation, on en conclut évidemment que les molécules peuvent rester, en vertu de leur inertie, dans un équilibre instable, lequel venant à être rompu en un point, toute la masse reprend son état normal, et, chose remarquable, les vibrations, plus que tout autre genre d'agitation, sont aptes à déterminer cet effet.

La fusion et la volatilisation sont donc deux phénomènes analogues; mais la quantité de vitesse que l'on doit communiquer aux molécules dans ces deux circonstances n'étant pas la même, la quantité de mouvement nécessaire à un corps pour passer d'un de ces états à l'autre sera pareillement différente. En effet, l'eau, en passant de l'état solide à l'état liquide absorbe 79 calories, et en se réduisant en vapeur elle en prend 606, c'est-à-dire 8 fois plus environ. Une fois le corps amené à un nouvel état, sa sensibilité au mouvement ne reste pas la même qu'auparavant, sa capacité calorifique change; ainsi la glace et l'eau ont

une chaleur spécifique assez différente, celle de la première est la moitié de la seconde. D'après les observations précédentes on peut facilement pressentir que les propriétés physiques des corps et leurs divers degrés de cohésion doivent influer sur la quantité de calorique nécessaire à leur dilatation ou à leur fusion, et nous verrons que ces résultats ont été vérifiés par l'expérience.

Il n'est pas hors de propos de comparer ici les forces moléculaires à celles qui nous sont mieux connues, et certainement on sera surpris en apprenant leur valeur numérique. La violence des effets produits par ces actions nous porte à croire que ces *infiniment* petits sont des puissances irrésistibles, et que les résistances les plus considérables ne peuvent lutter avec avantage contre ces *géants déguisés* [1]. La contraction éprouvée par le fer lors de son refroidissement peut être utilisée pour frapper les monnaies, et la dilatation de l'eau au moment de sa congélation fait éclater les canons les plus épais. Suivant M. Hirn, la résistance que l'on éprouve à désagréger l'eau chauffée à 100° équivaut à une pression de 27110 atmosphères; à 60° elle est de 47448 atmosphères, il s'agit ici d'un liquide; qu'on juge alors avec quelle épouvantable force se détendraient les molécules aqueuses si subitement les actions de cohésion venaient à cesser; et cependant on répète sans cesse que dans les liquides la cohésion est très-faible. La recherche du rapport des forces moléculaires à celles qui nous sont les plus familières, à la pesanteur par exemple, aura l'avantage de nous préparer au problème plus difficile de la corrélation des actions moléculaires et de l'attraction universelle.

D'illustres géomètres, et parmi eux Laplace, ont essayé d'expliquer les phénomènes moléculaires au moyen de

[1] Tyndal, *Mondes*, vol. II, p. 101.

l'attraction universelle. Il est facile de voir que de cette façon on arrive à des difficultés insolubles.

Le professeur Belli ayant étudié ce sujet à fond, dans un grand travail, nous extrayerons de ce mémoire toutes les conclusions utiles à notre sujet[1]. Ce savant a calculé quelle serait la force k avec laquelle s'attireraient en vertu de la seule gravitation, 2 kilogrammes de matière supposés concentrés chacun en un point mathématique et séparés par une distance de 1 mètre. La valeur de k est la quantité de mouvement qui serait acquise par l'un des corps pendant une seconde sous l'influence d'une force constante égale en intensité à l'attraction de l'autre, le nombre $\frac{k}{g}$ mesure cette force dans un lieu où g est l'intensité de la pesanteur. Faisant $g = 9^{m},81859$, on trouve $k = 0,000,000,000,367,990 \frac{1}{\delta'}$ en représentant par δ' la densité terrestre.

L'auteur a calculé ensuite l'attraction entre deux cubes de matière quelconque placés au contact ; il a trouvé que la densité de la terre étant supposée 5, l'intensité de cette attraction, pour deux cubes de fer de 1 centimètre de côté, est,

$$x = 0^{k},00000000000421807$$

c'est-à-dire un peu plus de 4 billionièmes de kilogramme. Or, la ténacité du fer est $T = 4470$ kilogramme, donc la valeur de x en fonction à T sera,

$$x = \frac{1}{1059,570000000000} T$$

c'est-à-dire une fraction insignifiante de la vraie valeur. De même, entre deux cubes de 1 mètre de côté mis en

[1] Belli, *Mémoire sur l'attraction moléculaire.* Milan, 1833.

contact, l'attraction serait à peine de 0,42 de gramme! par conséquent, une valeur infiniment inférieure à la vraie.

Mais, dira-t-on, dans les calculs précédents, on suppose avec les géomètres la matière continue ; si elle était agglomérée en sphères très-petites, d'une très-grande densité et d'un volume fort restreint par rapport à leur distance réciproque, peut-être obtiendrait-on une valeur assez grande pour la force attractive. Belli répond à cette observation en remarquant que l'attraction relative *c* de deux cubes au contact et celle *s* de deux sphères contenant une quantité de matière égale à celle des cubes, sont sensiblement dans la proportion suivante, $\frac{C}{S} = \frac{3}{2}$. Ainsi la différence ne sera jamais très-grande, et de plus la plus grande valeur appartiendra toujours aux cubes.

Supposons actuellement un corps formé d'un très-grand nombre de points placés à une certaine distance les uns des autres, mais d'une densité considérable; nous pourrons substituer à chacun d'eux une sphère ayant une densité finie, car il est reconnu qu'une sphère attire de même que si toute sa masse était réunie en son centre; par conséquent à un milieu composé de points matériels, on pourra substituer un certain nombre de sphères se touchant mutuellement. Cela posé, nous pouvons couper le corps par un grand nombre de plans tels, qu'ils le divisent en une suite de petits cubes, ayant à leur centre un point matériel, puis nous substituerons une sphère à chacun d'eux. La densité de ces sphères devra être (en tenant compte des vides et des parties pleines) la moitié de celle qui appartiendrait au corps supposé formé par une matière continue; mais ces sphères laissant entre elles des vides, nous les supposerons comblés, par l'addition d'une certaine quantité de matière, de telle sorte que chaque sphère sera remplacée par un petit cube. De cette manière, l'attraction ne sera certainement pas diminuée, elle sera même accrue,

puisque nous aurons ajouté de la matière et nous savons de plus que l'attraction exercée à masse égale par un cube surpasse celle produite par une sphère. Or, on a vu plus haut que ces cubes en vertu de la seule gravitation ne peuvent produire une force attractive comparable à la cohésion moléculaire, donc *a fortiori* il en sera de même pour un assemblage de sphères et par suite de points matériels, quelle que soit l'hypothèse admise sur la constitution de la matière.

Ainsi la théorie de Laplace ne rend pas exactement compte de l'attraction moléculaire, et celle-ci ne peut être attribuée exclusivement à la gravitation.

Il ne faut pas conclure cependant que l'hypothèse de Laplace soit inadmissible; on doit reconnaître seulement qu'elle est impossible en supposant la distribution uniforme des centres d'attraction. Si ces centres se réunissaient de manière à donner à la substance une texture filamenteuse, on pourrait obtenir un effet comparable à la cohésion, en admettant que la densité des filaments fût telle, que la section transversale d'un d'entre eux pût être contenue $10^{32\,000\,000\,000\,000\,000\,000}$ fois dans 1 centimètre carré; à la vérité, une densité aussi démesurément énorme est difficile à admettre. En effet, si la sphère limitée par les étoiles les plus voisines de nous était remplie de platine, et que tout ce métal pût être condensé au point de présenter le volume d'une tête d'épingle, on aurait ainsi à peine une idée de la densité représentée par le nombre cité plus haut.

Donc les forces moléculaires ou dépendent d'un principe autre que la gravitation universelle, ou bien si le principe est le même, la loi d'action est certainement différente. Du reste, comme nous le verrons plus tard, l'étude des autres forces de la nature conduit à la même conséquence. On peut encore citer le fait suivant comme une preuve palpable de la différence d'origine qui existe

entre les deux forces en question. Lorsqu'un corps est rompu, il ne suffit pas, pour ressouder les morceaux, de les affronter exactement, il est nécessaire de lui faire subir une nouvelle fusion. La raison en est simple : en remettant les parties séparées en contact, on ne rétablit pas les distances intermoléculaires dans leurs rapports nécessaires, et les mouvements atomiques dont l'ordonnance a été complétement troublée, et qui s'étaient constitués dans un nouvel état d'équilibre, ne reprennent pas ainsi leur régime primitif. Lors de la rupture d'un corps, il se produit un ébranlement violent dans les tranches solides qui se séparent. On sait en effet que si une corde de piano vient à se casser, il se dégage fréquemment lumière et chaleur.

Examinons maintenant un degré plus avancé de la transformation des corps, c'est-à-dire le changement de constitution, et voyons comment la théorie précédente peut encore s'appliquer à ces phénomènes.

CHAPITRE XI

DE LA DÉCOMPOSITION CHIMIQUE PAR L'ACTION DE LA CHALEUR, ET DE LA QUANTITÉ DE CHALEUR DES GAZ.

Il nous reste à parler finalement d'un troisième cas analogue aux deux précédents ; celui dans lequel le mouvement thermique augmentant d'intensité, non-seulement les groupes *physiques* dont les solides sont constitués, mais encore ceux d'ordre *chimique* qui forment les corps composés se détruisent peu à peu. Phénomène intéressant, car il nous fait voir que l'attraction physique et l'attraction chimique, comme on les appelle ordinairement, ne sont réellement pas de nature différente.

La chaleur est un des moyens d'analyse les plus puis-

sants que possède la chimie, une infinité de corps composés ne résistent pas à son action; si la température est peu élevée, les sels perdent leur eau d'hydratation; s'accroît-elle davantage, les oxydes et les carbonates sont réduits par la calcination, et ainsi de suite. *Corpora non agunt nisi soluta,* était un adage accepté par les anciens chimistes, et plusieurs d'entre eux regardaient la chaleur comme le dissolvant universel; pour les modernes, elle agit en mettant les molécules dans un état élastique, qui leur laisse une liberté favorable à l'exercice de leurs affinités mutuelles[1]. Ordinairement les corps les plus stables se décomposent en présence d'un autre ayant une grande affinité pour l'un de leurs éléments; mais par l'emploi de procédés assez simples, on peut décomposer un certain nombre de ces corps sans l'intervention d'aucun autre. L'eau, par exemple, peut être décomposée à une température assez inférieure à celle de sa formation. Il est remarquable que dans ces circonstances une certaine quantité de chaleur disparaît et devient latente, de même que cela se présente dans la vaporisation. Si l'on veut réaliser cette analyse, il faut s'arranger de manière à ce que les deux éléments de l'eau, une fois désunis, soient rapidement séparés l'un de l'autre alors qu'ils possèdent encore une haute température, sinon ils se recombinent au sortir de l'espace dans lequel ils viennent d'être isolés. La vapeur d'eau ne se décompose pas en traversant un tube de platine chauffé à un degré voisin de sa fusion; mais elle ne résiste pas à une température beaucoup moindre lorsqu'elle rencontre sur son trajet une substance capable de fixer un de ses éléments, et de le séparer de l'autre; ainsi agissent l'oxyde de plomb et certains corps absorbant l'oxygène, etc. Ces substances ne doivent pas nécessairement exercer une action dite d'affinité; quelques-

[1] Voyez ce qui a été dit plus haut, p. 68.

unes, en vertu d'un simple effet endosmotique, opèrent mécaniquement une véritable filtration. Ainsi l'eau, se décompose à une température relativement peu élevée si l'on fait usage d'un tube poreux, lequel permet à l'hydrogène de se séparer de l'oxygène, en vertu de sa force expansive.

Cette belle expérience a été récemment faite par M. Sainte-Claire-Deville, *a b* (fig. 8). Soit un tube de terre poreuse enfermé dans un autre plus large en porcelaine vernissée, tous deux munis de bouchons et de tuyaux disposés de façon à laisser entrer et sortir les gaz. Si à la température ordinaire on introduit de l'hydrogène dans le tube poreux et de l'acide carbonique dans l'espace annulaire, en examinant les gaz à leur sortie de l'appareil,

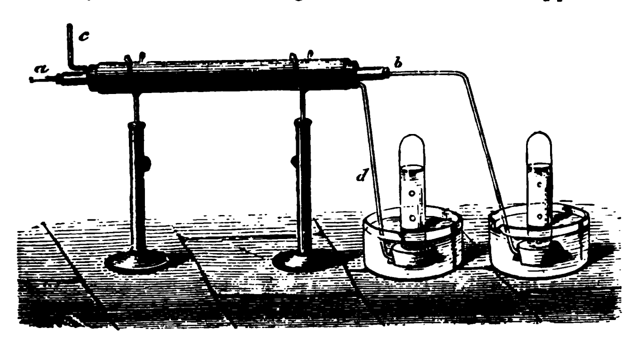


Fig. 8.

on recueillera l'acide carbonique à l'extrémité du tube intérieur *a b*, et l'hydrogènè se dégagera de l'espace annulaire, *c d*. Les gaz ont donc traversé la paroi poreuse chacun en sens opposé par un de ces effets d'endosmose et de diffusion dont nous avons parlé plus haut.

Supposons maintenant notre double tube porté à une haute température, à 1000° ou 1300°, par exemple; on fait passer un courant de vapeur d'eau dans le tube cen-

tral et un courant d'acide carbonique dans l'enceinte annulaire; alors il se dégage du tube extérieur un mélange détonant et du tube intérieur un mélange d'oxygène, d'oxyde de carbone et de vapeur d'eau. Voici comment les choses se sont passées : l'eau a été décomposée, son hydrogène a traversé la paroi poreuse de même que dans l'expérience précédente. Se trouvant alors en présence de l'acide carbonique, il l'a décomposé en oxygène et oxyde de carbone. Cet oxyde de carbone filtre dans le tube intérieur et en sort mêlé à l'oxygène provenant de l'eau décomposée.

Si, au lieu de recourir à la disposition précédente, on avait fait passer un courant de vapeur d'eau dans un tube en platine chauffé à une température voisine de sa fusion, l'eau, avons-nous dit, serait sortie indécomposée. En effet, ses éléments se seraient séparés dans la partie la plus chaude et recombinés dans la région plus froide. Grâce à cet appareil, on a pu isoler les gaz en les soustrayant à leur action réciproque. Dans l'expérience indiquée, la décomposition de l'eau s'opère à une température notablement moindre que celle de sa combinaison; le phénomène est comparable à l'évaporation : cette dernière se produit en effet à une température inférieure au point d'ébullition, et elle est favorisée par la présence d'une substance hygrométrique, absorbant la vapeur au fur et à mesure de sa formation.

Le fait qui nous intéresse le plus dans ces recherches est celui de l'absorption d'une certaine quantité de chaleur qui devient latente pendant la *dissociation* de la vapeur d'eau, pour employer l'expression de Deville; voici la valeur de quantité de chaleur absorbée[1].

MM. Debray et Deville ont conclu de leurs expériences que l'élévation de température produite par l'hydrogène

[1] Voyez *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 2 février 1863, t LVI, p. 199.

brûlant dans l'oxygène ne dépasse pas 2500°. A ce degré de chaleur, les gaz occupent un volume plus que décuple de celui qu'ils présentent à 0°, la vapeur d'eau ne peut donc résister sans se décomposer à une température capable de rendre son volume dix fois plus grand. En second lieu, la quantité de chaleur nécessaire pour élever ces gaz à 2500° (en supposant leur capacité calorifique constante) est égale à 637 + (2500—100) 0,475 = 1680 calories (le gramme étant pris comme unité). Dans cette expression 637 est la quantité de chaleur absorbée par 1 gramme d'eau pour passer à l'état de vapeur et s'élever de 0 à 100°; secondement le terme (2500—100) 0,475 représente le nombre de calories nécessaires pour élever ce gramme de 100° à 2500°. Telle est la quantité de chaleur maximum que peuvent renfermer les gaz au moment de leur décomposition. Voyons maintenant la quantité de chaleur dégagée pendant la combinaison. D'après les expériences de Favre et Silbermann, la chaleur produite lors de la formation de 1 gramme d'eau est 3833 calories. Mais la chaleur dégagée pendant la combinaison des gaz en quantités convenables pour donner naissance à 1 gramme d'eau, est précisément celle que doit perdre ce gramme d'eau lorsque, décomposé, ses éléments reprennent l'état gazeux. Or, si une telle quantité de chaleur était communiquée à ces corps, et que de cette chaleur aucune portion ne passât à l'état latent, leur température devrait s'élever à 6800°, nombre considérablement supérieur à celui trouvé par l'observation.

La différence ainsi constatée prouve l'absorption d'une certaine quantité de chaleur qui devient latente pendant la dissociation d'un corps; il est facile de trouver la valeur de cette quantité en faisant la soustraction des deux nombres cités plus haut : 3833 — 1680 = 2153 calories.

Cette immense quantité de chaleur de 2153 calories sert à donner aux gaz une force répulsive; et une force de

projection telles qu'ils ne puissent se recombiner et former de l'eau. Les phénomènes de dissociation à des températures peu élevées sont intéressants, car ils jettent un jour tout nouveau sur les décompositions opérées par la pile, comme nous le verrons plus tard.

Terminons ce paragraphe en cherchant la quantité de travail ou de force vive, qui, sous forme de chaleur, est *emmagasinée* dans une masse de gaz dosée de manière à pouvoir former de l'eau.

Supposons 1 kilogramme de ce mélange pris, pour nous conformer à l'usage reçu, à la température du zéro ordinaire, de la glace fondante; cependant il serait plus logique de mesurer ce volume à la température du zéro absolu, c'est-à-dire à —273° cent.

L'eau, pour passer de l'état solide à l'état liquide, absorbe	79,0 calories.
Pour se vaporiser à 0°	606,5
et si la vaporisation s'effectue à $t°$, il faudra $0{,}305t°$ calories de plus. Donc, pour élever à 100 degrés l'eau à l'état de vapeur saturée, il faudra.	30,5
Pour porter cette vapeur à la température de 2500°, qui est celle de la combustion de l'hydrogène; dans l'oxygène, la vapeur devenant *vapeur surchauffée*, comme disent les praticiens, pour chaque degré, il faut ajouter 0,44 calories, ou 0,475, selon d'autres; acceptant la première valeur, qui est la plus faible, on a la quantité de calories correspondant à 2500° — 100°	1056,0
en ajoutant le calorique de dissociation.	2153,0
Total.	3925,0 calories.

L'observation directe a donné pour la quantité de chaleur dégagée dans la production de l'eau par la combustion de l'hydrogène dans l'oxygène. . . .	3833 calories.
en y ajoutant le calorique de fusion de la glace. . .	79
Total.	3912 calories.

La petite différence entre les deux nombres trouvés peut

être attribuée aux incertitudes présentées par quelques-uns des coefficients employés.

Une calorie équivalant à 425 kilogrammètres, la quantité de chaleur obtenue représente un travail total de 1674336 kilogrammètres ou de 23381 chevaux-vapeur. Travail énorme dont nous pouvons à peine nous faire une idée, et qui, étant employée à produire de la chaleur par un moyen mécanique, fournirait par seconde une quantité de calorique égale à celle dégagée dans le même temps par la formation de 1 litre d'eau. Cette quantité de chaleur est égale à celle envoyée par un pied carré de la surface solaire pendant quelques minutes. Quelle force incompréhensible a été employée pour la formation des océans! Le sujet actuel nous entraîne à faire une application de ces théories à un des phénomènes les plus intéressants de la nature.

Depuis les âges historiques les plus reculés jusqu'à nos jours, la température du soleil n'a point changé, au moins d'une quantité accessible à nos procédés d'évaluation. Comment donc les pertes énormes éprouvées incessamment par l'astre central sont-elles réparées? D'où vient la chaleur du soleil et par quel moyen est-elle réparée?

Avant d'engager une hypothèse quelconque, remarquons que le soleil, dépensant sa chaleur, se refroidit nécessairement; mais son refroidissement se fait avec une telle lenteur, qu'il est insensible pour nous.

En supposant que le soleil fût un globe solide en ignition, sa combustion couvrirait au plus la dépense de quelques siècles. Si, au contraire, il est formé par une masse gazeuse à l'état de dissociation, il peut continuer à émettre chaleur et lumière pendant un temps beaucoup plus long, sans que sa température baisse d'une façon appréciable. La puissance thermique du soleil est évaluée 77000 chevaux-vapeur par mètre carré de surface. Or, 3 kilogrammes de gaz hydrogène et oxygène, en se combinant et se

transformant en glace à 0°, émettent un nombre de calories équivalant à 70143 chevaux-vapeur, c'est à peu près la quantité précédente. Il suffit donc que cette masse gazeuse se combine et se condense à l'état solide par chaque seconde de temps pour produire une énergie calorifique comparable à celle du soleil. Si la combinaison chimique s'effectue simplement sans être suivie de condensation ni à l'état liquide ni à l'état solide, il dégagera seulement les 2153 colories de dissociation, et, pour produire le même effet thermo-dynamique, il faudra une quantité de gaz double de la précédente à peu près; cette chaleur une fois dégagée, la masse restera encore à une température extrêmement élevée. Ceci posé, la masse solaire est de 2 quintillions de kilogrammes, soit kilogrammes 2×10^{30}, il devient donc facile de calculer combien de millions de siècles devraient s'écouler pour qu'une pareille masse dissociée parvienne tout entière à l'état de combinaison; pendant tout ce temps, elle aura émis incessamment de la chaleur, et sa température n'aura point diminué. Le calcul a été fait et a trouvé un nombre de siècles égal à 2×10^{20}, c'est-à-dire 200 trillions!

Disons à ce propos que la chaleur émanée d'un décimètre carré de superficie solaire étant de 772 chevaux-vapeur représente la puissance d'une de ces machines à vapeur employées à la propulsion des navires, et on a calculé que la température à la surface du soleil est de 15 à 45 fois supérieure à celle obtenue dans nos locomotives les plus puissantes. Enfin, terminons ces considérations en rappelant que la grande machine destinée au *Friedland*, qui était à l'Exposition de Paris en 1867, avait une force de 4000 chevaux-vapeur, et, pour entretenir son mouvement, il ne fallait pas moins de 8 énormes fourneaux incessamment chargés de charbon.

Nous voyons ainsi combien est petite notre unité de force par rapport à la grandeur des puissances mises en jeu

dans la nature, et combien sont faibles les agents mécaniques dont nous disposons, lorsqu'on les compare aux forces moléculaires. Nous trouverons encore, chemin faisant, d'autres faits du même genre, et alors ne soyons pas surpris s'il nous faut admettre emmaganisées dans les atomes des gaz une force vive, par suite une vitesse et une quantité de travail véritablement prodigieuses.

Pendant une combinaison chimique, ces vitesses s'éteignant partiellement dans l'une ou dans l'autre des substances en réaction, se communiquent au composé formé et aux corps environnants en produisant les effets mécaniques, tels que explosions et autres phénomènes semblables. Nous ne nous étendrons pas davantage sur ce sujet pour l'instant, remarquons seulement que dans un corps composé la plus grande partie du mouvement de translation qui appartenait aux molécules de ses éléments constitutifs doit y rester à l'état de rotation, car pendant la combinaison le choc des atomes a certainement communiqué un mouvement de rotation aux molécules ; et cela est nécessaire pour que dans le composé obtenu solide ou liquide les molécules se comportent à la façon des corps élastiques, précisément en vertu de la rotation qui les anime.

Ces décompositions chimiques, opérées par la chaleur, viennent à l'appui d'une hypothèse déjà énoncée, d'après laquelle, par une série des décompositions successives, il ne serait pas impossible d'arriver à extraire des corps réputés simples aujourd'hui, les vrais atomes simples ou éléments constitutifs de la matière. Alors on obtiendrait une matière très-raréfiée, d'une constitution physique, entièrement différente de celle que nous pouvons imaginer, d'après l'étude des corps ordinaires, lesquels présentent tous une structure extrêmement compliquée. Depuis Galilée et Newton jusqu'à nos jours, la croyance à la possibilité d'une telle décomposition est restée dans la science. En effet, quelle hypothèse plus simple permet de fournir

le dernier terme à la progression des phénomènes naturels dont les premiers éléments ont été découverts successivement? A cet état la matière a été tour à tour nommée infiniment petits dynamiques, molécules μ, igniculi, corpuscules ; nous l'appellerons simplement matière raréfiée.

Rien d'impossible à ce que cette même matière soit celle qui forme le milieu universel, servant à la propagation de la lumière et nommé éther, et même il serait difficile de trouver une meilleure hypothèse pour mettre d'accord les faits observés avec les opinions des philosophes. Ainsi, pour nous, l'éther sera constitué par les atomes primitifs de la matière ordinaire. La simplicité de constitution que nous attribuons au corps simple le plus léger connu, c'est-à-dire à l'hydrogène, est certainement très-éloignée de la simplicité atomique de l'éther; toutefois il est bon de remarquer que les corps simples formant une série dont les termes ont une constitution de moins en moins complexe, cette série doit avoir une fin : le terme extrême est l'éther; mais il est peu probable que nous disposions un jour de moyens capables de réduire la matière à un semblable état. La matière raréfiée doit se trouver partout et les atomes composés de la matière ordinaire dans leur mouvement doivent nécessairement la choquer, l'entraîner avec eux dans leur rotation et la disposer autour de leur surface sous forme de tourbillon; dans l'étude de la formation des corps, il faut donc tenir compte de l'influence de ces tourbillons et des pressions que peut exercer ce milieu universel. Dès lors, la théorie admise jusqu'ici est imparfaite, et nous devrons reprendre la question lorsque nous aurons établi sur des preuves suffisantes l'existence d'un milieu universel. En effet, deux molécules en rotation réunies par leur seule inertie, à la manière de deux corps durs, pour être séparés, exigeront un effort bien différent de celui qu'il faudrait employer pour les désunir si elles étaient rendues adhérentes par l'effet d'une pression extérieure

comme le sont les deux hémisphères de Magdebourg, par exemple.

Mais avant de donner à ce sujet un plus grand développement, il faut poursuivre l'exposition des faits et l'étude des rapports existant entre les propriétés physiques des corps et leurs propriétés thermiques, nous acquerrons ainsi de précieuses indications sur l'origine mécanique de la chaleur.

Souvent, pour éviter les périphrases inutiles, nous continuerons à employer les expressions anciennes, peu en rapport cependant avec la nouvelle théorie dynamique; en cela nous suivrons le conseil donné par Grove et nous nous servirons de ces termes comme d'expressions purement conventionnelles, destinées à représenter les différents états et modes d'action d'une seule et même cause, le mouvement. Les astronomes ne font pas autrement, en conservant une grande quantité de locutions basées sur le mouvement apparent, qui cependant n'existe pas [1].

CHAPITRE XII

DE QUELQUES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES CORPS ÉTUDIÉES AU POINT DE VUE DE LA THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

Nous avons vu jusqu'ici que généralement les changements d'état s'accompagnaient d'une absorption ou d'un dégagement de chaleur, fait dont on se rend compte facilement, car, suivant les cas, le travail effectué est positif

[1] Alors même que l'esprit serait conduit un jour à abandonner l'idée de forces diverses, à regarder tous les modes de force comme des manifestations différentes d'une seule et même force, ou à les résoudre définitivement en mouvements, il nous serait permis néanmoins d'employer certains termes conventionnels pour exprimer les différents modes d'action de cette force unique qui envahirait tout. (Grove, *Corrélat. des forces physiques*, p. 329. Paris, 1856.)

ou négatif. Mais dans ces circonstances, on observe souvent quelques particularités utiles à analyser avec attention sinon elles pourraient devenir un sujet de difficultés.

En considérant un changement dans l'état d'agrégation d'un corps comme résultat d'un travail, la quantité de force vive absorbée doit être proportionnelle au travail produit ; or, la grandeur de ce dernier variant avec les différents corps suivant leur disposition moléculaire et leur cohésion spéciale, de même les quantités de chaleur nécessaires à la fusion ou à l'évaporation des diverses substances ne doivent pas être égales entre elles. Ainsi la cohésion de la glace étant notablement moindre que celle du fer, la chaleur absorbée doit être moindre pendant la fusion de la première substance que pendant celle de la seconde. De plus, tout corps solide, avant d'entrer en fusion, exige une certaine élévation de température, lequel degré thermométrique dépend évidemment des obstacles plus ou moins grands opposés à l'action de force qui sépare les molécules.

Or, si on détermine les quantités dont nous avons parlé par rapport à des masses constantes, et en partant du zéro ordinaire correspondant à la glace fondante, on trouve qu'elles ne sont point en rapport avec les propriétés procédant des attractions moléculaires; de sorte que l'on pourrait tirer de là une sérieuse objection contre la théorie exposée précédemment. Mais en examinant les choses de près, on voit facilement qu'il ne faut pas s'étonner si la relation indiquée par la nouvelle théorie ne se vérifie pas; car le défaut de concordance provient des principes qui ont présidé à la détermination des termes du rapport. En effet, nous l'avons dit très-souvent déjà, 1° il n'existe aucun rapport entre le zéro conventionnel de notre thermomètre et les quantités absolues de chaleur contenues dans un corps; au contraire, tout indique que si l'on voulait obtenir des résultats com-

parables, il faudrait prendre comme point de départ ce zéro absolu fixé par nous à — 273°. 2° Lorsqu'on étudie les phénomènes régis par l'amplitude des oscillations moléculaires, par exemple la variation de volume d'un corps sous l'influence de la température, il est fort peu rationnel de rapporter les valeurs aux poids et non aux volumes. En effet, dans la théorie mécanique, toutes ces questions se réduisent à des calculs de volumes[1]. Par suite, une loi peut ne pas se manifester si l'on adopte le zéro ordinaire, et la considération des poids, au contraire, devenir évidente si l'on prend comme bases le zéro absolu et l'observation des volumes. Semblable chose se présente lorsqu'on cherche à établir les lois de la dilatation, on doit déterminer la variation des volumes bien plutôt que celle des poids. Du reste dans ce cas, l'expérience elle-même a conduit les physiciens à opérer ainsi.

Suivons donc ces préceptes (*a*) pour calculer les *calories de fusibilité*, c'est-à-dire les quantités de chaleur nécessaires pour porter de — 273° à la température de la fusion un volume égal de toutes les substances. Nous voyons alors les corps les plus tenaces et les plus résistants être précisément ceux qui absorbent le plus de chaleur. (*b*) La conclusion est la même si, opérant non pas sur des poids égaux de substances, mais sur des volumes égaux, nous cherchons les *calories de fusion*, c'est-à-dire les quantités de chaleur qui, suivant l'ancienne expression, deviennent latentes pendant la fusion. (*c*) Et enfin la même proportion s'observe relativement à la dilatabilité des corps.

M. Cantoni[2], dans le travail déjà cité, ayant fait ces calculs et ces comparaisons, a dressé la table suivante pour les caloriques de *fusibilité*.

[1] Voyez à la fin de ce chapitre les formules établies par les théoriciens.

[2] Voyez plus haut, p. 60, et l'opuscule déjà cité, p. 47.

MÉTAUX.	Calories de fusibilité à vol. égaux.
Fer	1576
Cobalt	1527
Platine	1428
Or	1211
Cuivre	1170
Argent	770
Aluminium	606
Zinc	469
Cadmium	295
Antimoine	240
Plomb	218
Étain	212
Bismuth	164

MÉTAUX.	Calories de fusibilité à vol. égaux.
Mercure [1]	106
Sodium	83
Potassium	46
MÉTALLOIDES.	
Sélénium	147
Soufre	137
Phosphore	105
Iode	101
Brome	67
CORPS COMPOSÉS.	
Glace	119

D'après ce tableau, la loi ci-dessus énoncée est évidente, et nous pouvons poser les conclusions suivantes : 1° Le nombre de calories nécessaires pour amener une substance au point de fusion est d'autant plus considérable qu'elle est plus tenace et plus dure; 2° A ténacité égale les corps homogènes et de structure cristalline très-peu marquée ont un calorique de fusibilité moins élevé, tels sont le plomb, l'argent, etc.; 3° Les corps appartenant à des classes différentes, les métaux et les métalloïdes par exemple, ne suivent pas les mêmes lois.

Voici maintenant les calories de *fusion* rapportées à des *volumes égaux* [2] :

MÉTAUX.	Calories de fusion à vol. égaux.	Somme des calories de fusion et de fusibilité à vol. égaux.
Argent	208,1	966
Zinc	186,1	664
Bismuth	123,1	285
Étain	114,7	310
Plomb	59,8	273
Mercure	40,9	144

[1] Solide à — 40°.
[2] Cantoni, p. 51, où d'autres exemples sont cités en grand nombre

MÉTALLOÏDES.

Iode.	55,3	106
Brome.	51,7	119
Soufre.	18,1	155
Phosphore.	8,8	114

CORPS COMPOSÉS.

Nitrate de soude. . . .	138,6
Phosphate de soude. . .	97,0
Glace.	72,7 *
Cire d'abeilles.	36,5

Ces exemples peu nombreux (car nous avons limité nos citations) suffisent cependant pour mettre en pleine évidence la relation signalée entre la cohésion d'un corps et la quantité de calorique nécessaire pour détruire cette force et amener le corps à l'état liquide. Nous voyons, en effet, les nombres de calories être proportionnels à la ténacité que présentent les diverses substances à une température peu élevée.

Cependant ces rapports ne sont pas aussi simples et aussi saillants qu'on pourrait le désirer; car lors de la rupture d'un solide, il faut tenir compte d'un grand nombre d'éléments qui tous prennent part au travail passif de la séparation et de la désagrégation des molécules. Les éléments du problème varient d'une substance à l'autre. Dans certains corps, en effet, il faut faire la part de la dureté, dans d'autres de la ténacité; pour ceux-ci de l'élasticité, pour ceux-là de la flexibilité. Or un grand nombre de ces propriétés sont jusqu'à présent mal connues, et il serait impossible d'en fixer la véritable mesure et le coefficient. L'influence de la forme cristalline se fait sentir dans presque tous les corps, et à tel point que la même substance absorbe pour fondre une quantité de chaleur différente suivant qu'elle est amorphe ou cristallisée. De plus, il faut encore tenir compte de la variation de volume qui se produit subitement pendant la liquéfaction, et constitue un nouveau tra-

* On trouve 79,2 en prenant le poids pour unité.

vail. On peut considérer ces actions moléculaires comme autant de pressions intérieures s'opposant à la séparation des molécules, et il doit arriver, pour elles, ce que l'on observe relativement aux pressions extérieures, lesquelles changent le point de fusion ou de solidification des corps. Ainsi, à l'aide d'une pression suffisante on peut abaisser le point de solidification de l'eau au-dessous de zéro, et on a pu la maintenir liquide jusqu'à — 18° en la comprimant à 1000 atmosphères (Mousson). Or, comme au-dessous de zéro l'eau continue à se dilater, et comme cette dilatation augmente encore lors de sa cristallisation, on comprend pourquoi, renfermée dans un vase assez résistant pour ne point céder à cet effort expansif, l'eau refroidie à une très-basse température reste toujours liquide, ainsi que Rumford l'a expérimenté. Il est bon de savoir que l'abaissement du point de solidification de l'eau par l'influence de la pression a été indiqué *a priori* comme une conséquence de la théorie mécanique de la chaleur[1]; et cette même théorie nous a appris que la réciproque devait être vraie; c'est-à-dire que l'on pouvait élever le point de solidification des substances qui se contractent au moment où elles reprennent l'état solide. L'expérience a confirmé cette nouvelle déduction. En effet, le soufre qui, éprouve une contraction lors de sa solidification, fond à 107°, sous une pression de 1 atmosphère et à 140° sous une pression de 808 atmosphères.

On peut suivre un second procédé pour transformer un solide en liquide; il consiste à en opérer la dissolution dans un liquide. Dans ces conditions, il se produit également une absorption de chaleur, et il nous faut déterminer toutes les circonstances qui peuvent exercer une certaine influence sur le phénomène. Parmi celles-ci, outre la désagrégation du corps solide, on doit compter le travail nécessaire pour disséminer le solide dans le dissolvant, et le changement

[1] W. Thomson, *on the Dynamical theory of heat*. Trans. R. Soc. Edimb., 1852, p. 271.

de volume survenu dans le mélange. L'expérience prouve que l'absorption de chaleur est plus grande lorsque le mélange est fait avec une grande quantité de liquide, et lorsqu'il y a augmentation de volume[1]. Au moment du mélange de certains corps solides, il peut survenir une liquéfaction. Le phénomène est alors assez complexe, car d'une part l'action chimique n'étant pas étrangère au phénomène, la chaleur qu'elle dégage favorise la fusion des solides, et d'une autre le changement d'état détermine un refroidissement. Tel est le cas des mélanges réfrigérants que l'on forme soit avec la glace et le sel, soit avec d'autres substances. Dans les divers cas de la pratique, il sera toujours possible de reconnaître quel est le résultat final produit par la force vive *calorifique* fournie aux substances; mais il sera difficile d'évaluer exactement quelle espèce de travail elle aura accompli.

Les considérations précédentes relatives aux phénomènes accompagnant la fusion des solides considérés sous le rapport de l'excursion moléculaire, et la nécessité de calculer leurs éléments numériques en les rapportant aux volumes, peuvent s'appliquer également à la vaporisation. Si, comme cela se pratique habituellement, on évalue par rapport aux poids les calories de vaporisation (le calorique dit latent), on ne trouve aucune relation entre ces quantités et les propriétés physiques des corps, tandis que faisant les calculs sur des volumes égaux, la relation est évidente. Voici des exemples :

	Calorique de vapeur à volume égal.	Total.	Calorique de vapeur à poids égal.
Mercure.	988,7	1145,0	77
Eau.	514,1	610,0	536
Alcool méthylique. . . .	200,5	234,1	261
Acide sulfureux.	138,0	138,0	94
Essence de thérébentine.	58,8	124,0	58
Éther acétique.	86,6	119,9	105
Soufre.	111,8	279,7	72
Iode.	88,4	181,7	23

[1] Voyez Cantoni, *op. cit.*, p. 58.

Ce tableau montre clairement comment les liquides les plus denses nécessitent un nombre de calories plus grand.

Le calorique de vaporisation varie suivant le degré de cohésion des liquides et non pas suivant leur viscosité. Nous avons déjà vu que les vapeurs ont généralement une capacité calorifique moindre (environ de moitié) que celle des liquides générateurs [1]. Si les capacités sont rapportées aux volumes, la loi est encore plus évidente. Dans ces corps, on doit tenir compte de deux quantités de chaleur: une d'élasticité et l'autre de vaporisation (comme nous l'avons vu à la page 83), et cette dernière étant tout entière employée à désagréger les molécules, les liquides, dont les molécules sont fortement unies entre elles, doivent présenter les chaleurs de vaporisation les plus élevées.

En effet, la quantité de travail nécessaire pour séparer les molécules ayant été évaluées en kilogrammètres, on a trouvé pour le mercure 385 kilogrammètres, tandis que, pour l'eau, elle est de 318 kilogrammètres, et, pour l'alcool méthylique, 78 kilogrammètres. Au contraire, la chaleur sensible produisant simplement la dilatation est exprimée, pour ces mêmes corps, par les nombres 79, 59, 16, et leurs cohésions respectives par 1,92, 1,00, 0,39. Une remarque bonne à signaler, c'est que, dans les divers liquides, le rapport entre les deux genres de travail dont nous avons parlé est sensiblement constant et égal à 11; il croît un peu avec la température [2]. Nous avons cité seulement quelques exemples; on pourra en trouver un plus grand nombre dans le remarquable ouvrage de Cantoni.

D'une manière générale, on peut dire que, pour séparer les molécules d'un corps liquide, il faut une plus grande quantité de chaleur que pour fondre la même substance

[1] Cantoni, *op. cit.*, p. 73.
[2] *Ibid.*, p. 78.

prise à l'état solide. Donc, eu égard à l'intensité de l'attraction moléculaire, la différence entre un liquide et une vapeur est plus grande que celle qui sépare un liquide d'un solide, fait déjà révélé par d'autres phénomènes. Mais, jusqu'à présent, on n'a pas encore découvert la loi suivant laquelle varient ces quantités de chaleur pour un même corps, et encore moins pour des corps de nature différente. Ainsi, pour désagréger 1 litre d'eau et le convertir en vapeur, il faut presque une quantité de chaleur égale à celle qui pourrait fondre un égal volume de fer.

Cherchons maintenant quelle relation existe entre les propriétés physiques d'un corps : dureté, ténacité, élasticité, etc., et les quantités de chaleur nécessaires pour produire dans ce corps des modifications autres que les changements d'état. Examinons d'abord les quantités de chaleur absorbées par des volumes égaux des diverses substances pour élever leur température d'un nombre déterminé de degrés, c'est-à-dire ce que deviennent les capacités calorifiques, en les rapportant non au poids, mais au volume, nous trouvons la série suivante[1] :

SUBSTANCES.	Calories pour 1°.	SUBSTANCES.	Calories pour 1°.
Potassium	0,143	Lithium	0,559
Sodium	0,283	Molybdène	0,567
Iode	0,267	Tungstène	0,587
Tellure	0,286	Rhodium	0,615
Bismuth	0,305	Or	0,624
Antimoine	0,340	Osmium	0,662
Sélénium	0,343	Zinc	0,669
Plomb	0,357	Palladium	0,670
Soufre	0,359	Iridium	0,678
Étain	0,415	Platine	0,685
Magnésium	0,435	Bore	0,695
Silicium	0,428	Cuivre	0,842
Arsenic	0,440	Fer	0,882
Cadmium	0,487	Cobalt	0,906
Diamant	0,519	Manganèse	0,921
Aluminium	0,556	Nickel	0,961

[1] Cantoni, p. 15.

sulfurique, elles sont exprimées par des nombres supérieurs à ceux correspondant aux liquides plus volatils.

Si maintenant nous établissons la relation entre l'élasticité, la densité, la ténacité, etc., et les chaleurs spécifiques, nous trouverons que ces dernières sont proportionnelles aux produits du rapport inverse de la densité par le rapport direct de la cohésion relative, et par suite que les capacités caloriques sont directement proportionnelles à la cohésion des corps[1]. Parmi les propriétés moléculaires des corps, une des plus remarquables est l'élasticité; elle nous montre les molécules susceptibles d'un certain déplacement, de telle sorte que l'on peut évaluer l'élasticité d'après l'allongement produit par un poids déterminé, pourvu que la position des molécules ne soit pas changée d'une façon permanente, c'est-à-dire que l'accroissement de longueur ne devienne pas définitif. Or l'allongement observé dans ces conditions suppose un travail effectué; par conséquent, il y a lieu de rechercher si une certaine relation existe entre cette dilatation forcée artificielle et celle que la chaleur produit naturellement. On a constaté que le rapport entre la chaleur spécifique et le coefficient d'élasticité est à peu près constant pour tous les métaux non cristallisés et a pour expression 1,36[2]. Donc, si une quantité donnée de chaleur agit sur un volume égal de ces métaux, elle produira dans les distances moléculaires un accroissement égal à celui que l'on obtiendrait par la traction exercée à l'aide d'un certain poids sur les verges métalliques.

La valeur du rapport qui vient d'être cité permet de cal-

[1] Soient c, c' les chaleurs spécifiques prises à poids égaux des corps dont les densités sont d et d' et la cohésion K et K'. On a trouvé que $\frac{c}{c'} = \frac{d'}{d} \times \frac{K}{K'}$. Donc, $\frac{cd}{c'd'} = \frac{K}{K'}$. Or cD et $c'D'$ sont les capacités calorifiques de l'unité de volume. (*Note du traducteur.*)

[2] Voyez Cantoni, p. 24, et son *Manuel de physique*, p. 531, dans la note.

culer l'équivalent mécanique de la chaleur ; on trouve, par ce procédé, 424 kilogrammètres. Un tel résultat nous fournit une remarquable confirmation de la théorie, et il suffit pour faire disparaître toutes les incertitudes relatives aux diverses manières de mesurer les coefficients d'élasticité. D'une manière générale, on peut dire que les chaleurs spécifiques, prises à volume égal, sont proportionnelles aux produits des rapports directs des coefficients d'élasticité et de dilatation.

Dans les métaux soit à structure cristalline, soit écrouis par leur passage à la filière, les coefficients dont nous parlons subissent des variations, mais alors il y a une autre cause d'absorption de travail ; c'est l'orientation des molécules. Cette circonstance doit exercer une notable influence, la preuve en est que dans les minéraux les chaleurs spécifiques sont différentes suivant la forme cristalline. Ainsi on voit dans un grand nombre de minéraux qui cristallisent, soit en cube, soit en prisme droit à base rhombe, soit en prisme rhomboïdal, les chaleurs spécifiques être directement proportionnelles à leur dureté relative ; et au contraire, pour ceux dont la forme typique est le rhomboèdre, elles varient en raison inverse de la dureté. En outre, sur ces derniers, on reconnaît que les chaleurs spécifiques sont d'autant plus élevées, qu'il existe une plus grande différence d'élasticité suivant les axes de cristallisation. En général, les capacités calorifiques des substances cristallisées sont plus grandes que celles des métaux à structure uniforme. Il n'est pas inutile de rapprocher cette propriété de cette autre, que les réactifs chimiques agissent différemment sur les corps, selon qu'ils se présentent cristallisés ou amorphes, et l'on comprend que, dans ces deux cas, la dureté n'est pas la même[1].

[1] Voyez Cantoni, p. 29.

Les faits observés jusqu'ici sur les cristaux sont fort peu nombreux, mais s'ils ne permettent pas d'établir des lois générales et absolues, ils suffisent cependant pour nous guider dans l'étude de nombreux phénomènes. Par exemple, ils sont très-utiles pour expliquer les singularités présentées par l'eau. Ces questions peuvent être traitées sous un point de vue plus juste et plus fécond en résultats que celui sous lequel on les a envisagées jusqu'à présent. Il est donc à désirer que les recherches commencées par Cantoni soient poursuivies sur un grand nombre de corps. Le travail de ce physicien renferme encore d'autres résultats fort remarquables, mais nous renvoyons le lecteur au mémoire original, et nous terminerons en rappelant quelques faits relatifs aux liquides et aux gaz.

On a remarqué sur un grand nombre de liquides indécomposables par la chaleur, que les nombres de calories nécessaires pour produire une égale augmentation de volume sont plus élevés lorsque la substance est à l'état solide que si elle est liquide. Ainsi, pour le soufre, on a les nombres 0,225 et 0,082; pour l'iode, 0,1086 et 0,496, et pour le phosphore, 0,0901 et 0,0654[1]. Toutes ces valeurs, aussi bien pour les solides que pour les liquides, décroissent à mesure que la température s'accroît : résultat facile à comprendre, puisque au fur et à mesure que diminue la résistance des liens qui unissent naturellement les molécules, on éprouve une moins grande difficulté à séparer celles-ci; et elles seront d'autant plus faciles à désagréger, qu'elles seront plus éloignées les unes des autres. Aussi, pour l'eau, voit-on la viscosité et les actions capillaires diminuer avec la température, de même que la valeur de la capacité calorifique.

Dans les gaz le travail intérieur, antagoniste de la cohésion, est sensiblement nul, et, par suite, les gaz parfaits, à

[1] Voyez Cantoni, p. 40.

volume égal et sous une pression constante, ont la même capacité calorifique, tandis que les chaleurs spécifiques, sous des poids égaux, diffèrent énormément les uns des autres.

En second lieu, dans les gaz soit simples, soit composés, les capacités calorifiques et les chaleurs de dilatation sont plus grandes, à volume égal, pour ceux dont la dilatabilité est la plus prononcée; elles sont, en outre, en rapport avec la densité relative de ces corps et le très-faible degré de cohésion que peuvent présenter leurs molécules, car dans tous les fluides aériformes les molécules ne jouissent pas d'une égale liberté; beaucoup d'entre eux qui, à la température ordinaire, se présentent sous la forme gazeuse, sont véritablement des vapeurs faciles à liquéfier et même à solidifier par des moyens artificiels.

Les lois de Mariotte et de Gay-Lussac ne se vérifient pas complétement pour ces gaz. Cependant, même dans ce cas, les chaleurs de dilatation, calculées comme on l'a fait pour les solides, c'est-à-dire sous des volumes égaux, diffèrent entre elles beaucoup moins que si on les rapporte à des poids égaux, et les valeurs sont d'autant plus élevées que les corps sont plus rapprochés de leur point de liquéfaction. Ainsi l'acide carbonique, l'acide sulfureux et le protoxyde d'azote, donnent 0,0000116, tandis que pour les gaz permanents et l'oxyde de carbone, on trouve 0,0000083. D'après M. Hirn, lorsque la vapeur d'eau est soumise à une pression de 32 atmosphères, l'influence moléculaire intérieure acquiert une valeur que l'on peut estimer à 6 atmosphères $\frac{1}{3}$, quantité nullement négligeable. A vrai dire, il n'y a aucune limite tranchée entre les solides, les liquides et les gaz eux-mêmes, au point de vue des résistances intérieures.

La conductibilité des corps pour la chaleur est également en relation avec leurs propriétés moléculaires énoncées ci-dessus. En général les corps *ductiles*, mais mous et non élastiques, sont mauvais conducteurs; exemple les ar-

giles, les cires, etc., et parmi les métaux, les moins bons conducteurs sont les plus malléables et les moins élastiques, tels que potassium, sodium, plomb. La conductibilité calorifique semble donc exiger de la part des molécules deux conditions : d'abord une grande facilité au déplacement (qui produit la ductilité), puis un retour rapide à leur position d'équilibre (qui produit l'élasticité). Une de ces propriétés à l'exclusion de l'autre ne suffit pas pour constituer une matière conductrice. Tel est le cas des corps vitreux, qui jouissent bien d'une très-grande élasticité, mais ne présentent aucune ductilité. Nous verrons ailleurs une nombreuse série de propriétés liées à cet état moléculaire ; pour le moment, notons que les métaux présentant une conductibilité presque parfaite, sont les métaux nobles, or, argent, platine, cuivre, etc., dans lesquels le déplacement moléculaire peut s'accomplir dans des limites assez étendues et qui jouissent d'une ductilité et d'une élasticité très-grandes.

La raison du fait paraît être celle-ci : plus les molécules d'un corps sont aptes à faire des excursions ayant une amplitude relativement considérable, et à revenir facilement à leur position d'équilibre, plus facilement aussi elles peuvent heurter violemment les molécules environnantes et communiquer le mouvement qui les anime à une plus grande distance. Or, ces conditions favorisent certainement la propagation du mouvement vibratoire calorifique dans les corps.

Dans les liquides, la chaleur se propage par le moyen de courants causés par des différences de densité, mais on ne peut leur refuser cependant une véritable conductibilité ; Magnus l'a démontré, et il en est de même et mieux encore pour les gaz. De tous les fluides, les meilleurs conducteurs sont ceux dont la mobilité est la plus grande, ainsi l'hydrogène parmi les gaz, et le mercure parmi les liquides.

De tout ce qui a été dit jusqu'à présent, tirons cette conclusion : les forces moléculaires, quelle que soit leur origine, diminuent d'intensité à mesure que la distance entre leurs centres d'action augmente; toutes les circonstances qui accroissent cette distance affaiblissent l'énergie de ces forces, et, par suite, diminuent la quantité de travail à dépenser pour produire un certain effet sur les corps eux-mêmes.

Tout se ramène donc à un principe fondamental : *la quantité de chaleur nécessaire pour produire un effet donné est toujours proportionnelle au travail absorbé par les molécules 1° pour vaincre les résistances qui s'opposent à la manifestation de cet effet, 2° pour augmenter l'amplitude des oscillations et des vibrations des molécules elles-mêmes.*

Ainsi se trouvent justifiées les réflexions relatives au travail intérieur du corps par lesquelles nous terminions le chapitre v, et l'on peut affirmer que le jour où les observations et les expériences auront été faites en nombre suffisant, il sera possible de calculer la valeur de toutes ces forces moléculaires, et même quelques déterminations de ce genre ont été déjà faites dans un petit nombre de cas. Nous comprenons encore pourquoi les physiciens modernes se sont vus dans la nécessité de reconnaître à une même substance deux capacités calorifiques; l'une, la seule admise jusqu'alors, est relative au travail total accompli par le corps ; l'autre, dite capacité *absolue*, se rapporte seulement à l'échauffement de la matière. Exemple pour l'eau : la chaleur spécifique ordinaire = 1, et la chaleur spécifique absolue = 0,4.

Donc la théorie mécanique offre un moyen d'expliquer et de coordonner une infinité de faits qui, jusqu'alors, paraissaient fort éloignés les uns des autres, et ce seul avantage suffirait pour la faire adopter comme une hypothèse physique extrêmement rationnelle, quand bien même nous n'en aurions pas établi jusqu'à l'évidence les

principes fondamentaux comme nous l'avons fait plus haut. Avec ce système disparaît la théorie absurde dans laquelle les diverses formes de la matière sont assimilées à des récipients, véritables cachettes dans lesquelles le calorique se dissimule pendant un temps plus ou moins long ; puis tout à coup il s'en échappe et se produit au dehors.

Les faits nous enseignent que si tous les corps n'ont pas la même capacité calorifique, cela résulte simplement de ce que les diverses substances requièrent des quantités de mouvement différentes pour produire un certain travail intérieur dont l'intensité varie suivant la grandeur de l'excursion que doivent faire les molécules et des résistances qu'elles doivent surmonter.

CHAPITRE XIII

DE L'ÉCHANGE DU CALORIQUE ENTRE LES CORPS DE NATURE DIFFÉRENTE : LOI DES ÉQUIVALENTS CHIMIQUES.

Jusqu'ici nous avons étudié les modifications produites dans les corps par le calorique, en considérant seulement les variations survenues dans leurs propriétés physiques et leurs divers états ; autrement dit, nous nous sommes bornés à rechercher quelle était l'influence de la chaleur sur les manifestations de l'attraction dite homogène. Nous devons examiner actuellement les effets de l'attraction agissant entre corps chimiquement différents, et nommée attraction hétérogène. Ici nous aurons à rechercher successivement quelles sont : 1° les quantités de chaleur nécessaires pour élever la température des substances chimiquement différentes ; 2° les quantités de chaleur qui se développent dans les combinaisons chimiques. Commençons par l'étude des premières.

On a reconnu que généralement deux masses inégales

d'une même substance à des températures différentes étant mélangées, la température résultante est la moyenne des deux températures prises par rapport aux poids des masses mélangées. Phénomène tout à fait comparable à celui observé lors d'un échange de mouvement entre corps non élastiques; d'où une nouvelle preuve à l'appui de la théorie dynamique de la chaleur. Nous avons dit : les choses se passent ainsi généralement, car la capacité calorifique décroissant un peu lorsque la température augmente, la loi ne peut être absolument rigoureuse.

Mais si les corps mélangés sont de nature différente, et, par suite, de capacité calorifique différente, il faut tenir compte de ces dernières, et l'énergie calorifique d'un corps se mesure en faisant le produit de la masse par la température, par la capacité calorifique et par l'équivalent mécanique de la chaleur[1].

Cherchons maintenant quelle relation existe entre la capacité calorifique et les autres propriétés spécifiques des corps.

En comparant la table des chaleurs spécifiques à celle des densités ou poids spécifiques, on n'aperçoit aucune relation entre ces deux éléments; par contre, on a découvert, nous l'avons dit plus haut, un rapport intime entre les chaleurs spécifiques et les propriétés physiques attribuées à l'attraction moléculaire; mais on est loin d'avoir établi la loi de ce rapport. Laissons donc de côté les propriétés physiques, et voyons les relations qui peuvent exister entre les manifestations thermiques et les caractéristiques chimiques. Nous pouvons alors établir facilement des rapprochements très-remarquables. En comparant le calorique spécifique d'un corps C au poids de son équivalent chimique P ou poids atomique, on trouve que le premier est maximum lorsque le second est minimum, en telle

[1] Rankine, *Arch. physique*, 1859, vol. V, p. 68.

manière que le produit $C \times P$ demeure constant. Cette importante découverte est due à Dulong et Petit, elle fait entrer toute la chimie dans le domaine de la mécanique, et nous devons nous y arrêter un instant.

1° La loi dont nous parlons, établie, par les savants qui la découvrirent, pour un petit nombre de métaux, a été trouvée très-approximativement vraie pour tous les autres corps simples et pour un grand nombre de substances composées; on peut donc l'admettre comme générale en faisant les restrictions suivantes : 1° le produit $C \times P$ n'est pas rigoureusement le même pour tous les corps dits élémentaires, mais il varie légèrement suivant la classe et la famille auxquelles ils appartiennent; 2° pour les corps composés, le produit observé est sensiblement la somme des produits afférents à leurs composants; 3° l'état physique influe sur la valeur de ce produit.

En opérant sur les métaux, on trouve le produit $C \times P = 3{,}13$[1]; quelques valeurs s'écartent de cette moyenne, mais les discordances sont d'une faible importance si on les compare aux variations présentées par les facteurs du produit; en effet, tandis que les chaleurs spécifiques oscillent entre 1 et 30,5, les produits $P \times C$ varient seulement de 2,97 (aluminium) à 3,32 (sodium).

Aux métalloïdes, tels que bore, phosphore, silicium, iode, correspondent des produits dont la valeur est assez rapprochée de la moyenne, car elle est renfermée dans les limites 2,86 et 3,43; mais on sait combien sont grandes les différences de structure présentées par ces corps, et, par suite, il n'est pas aisé de déterminer les éléments du produit $P \times C$; et même, en réfléchissant aux difficultés

[1] Nous adoptons les nombres donnés par Cantoni; ils supposent l'équivalent ou le poids atomique de l'hydrogène $= 1$. Ceux fournis par d'autres chimistes sont pris par rapport à l'équivalent de l'oxygène $= 100$ et se réduisent aux premiers si on les divise par 12,5. La valeur moyenne du produit est alors sensiblement 40.

pratiques des expériences, et à la multiplicité des élément nécessaires pour obtenir les nombres cherchés, on doit s'étonner de trouver une telle concordance entre les résultats, au lieu d'être surpris des petites différences constatées.

Les corps simples liquides donnent un produit 3,69, valeur assez voisine de celle qui convient aux solides.

Avec les gaz parfaits, c'est-à-dire l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, on trouve 3,87, pourvu que l'on prenne la moitié de l'équivalent de l'oxygène[1]. Il est nécessaire de diviser par 2 l'équivalent de certaines substances pour les faire rentrer dans la loi générale, et il n'est pas difficile de comprendre la raison de cette division, car l'équivalent représente le nombre, variable d'un corps à l'autre, des atomes qui entrent dans la constitution du composé considéré par les chimistes comme le plus simple de tous; or ce composé peut parfaitement ne pas être aussi simple que l'on veut bien le supposer; ajoutons encore que cette division par 2 se rapporte à l'oxygène, corps simple dont nous connaissons un état allotropique, l'ozone qui, selon toute probabilité, d'après Clausius, est formée par le gaz lui-même dans un état de dissociation spécial. On peut donc soupçonner que semblable chose doive arriver pour d'autres corps, et nous citerons bientôt des preuves à l'appui de cette opinion.

Le chlore, le brome, donnent la valeur 4,310 et 4,316; un aussi grand écart de la moyenne générale n'est pas surprenant lorsqu'il s'agit de corps dont la simplicité de constitution est très-problématique.

2° La loi énoncée s'applique également, avons-nous dit, aux corps composés, et il est admis que le calorique spécifique d'un corps composé est sensiblement égal à la somme des chaleurs spécifiques des atomes simples dont il est formé, en tenant compte, bien entendu, du nombre

[1] Ici nous adoptons les valeurs données par Hirn, pour les raisons que nous dirons ci-après.

relatif d'atomes. Le produit P × C varie un peu d'un composé à l'autre, mais il reste constant pour un même type de combinaison. Voici des exemples dans lesquels R représente le radical :

Substances.	Composition.	Valeur de P×C.
Sulfures	RS.	2 × 2,98 .
Chlorures.	RCl^2.	3 × 3,12
Id.	R^2Cl^2.	4 × 3,17
Oxydes.	RO.	2 × 2,76
Id.	A^2O^3.	5 × 2,72
Acides	RO^2.	3 × 2,31
Id.	RO^3.	4 × 2,26
Carbonates	CO^2,RO. . . .	5 × 2,14
Sulfates.	SO^3,RO. . . .	6 × 2,22
Nitrates.	AzO^5,R^2O. . .	9 × 2,67

Dans la dernière colonne, le premier facteur exprime le nombre des atomes du composé, et l'autre, le multiplicateur qui devrait être la valeur du produit P×C attribuée plus haut à chacun des éléments formant la combinaison. On voit que ce second facteur est généralement inférieur à la moyenne indiquée, mais la différence est faible. Toutefois on ne peut admettre le principe général posé par Garnier, à savoir que les chaleurs spécifiques de tous les corps simples ou composés sont inversement proportionnels aux poids atomiques moyens, car plus la combinaison est complexe et moindre est la valeur du second facteur; de plus, on a observé que l'instabilité du composé varie parallèlement à la décroissance de ce facteur[1].

La loi de Dulong et Petit ne se vérifie donc pas rigoureusement. Néanmoins on a lieu d'être frappé de la valeur très-sensiblement constante du produit P×C, et on arrive à se demander : Le produit P × C n'est-il pas théoriquement toujours le même, et les différences révélées par l'observation ne sont-elles pas dues à certaines causes perturbatrices?

[1] Hirn, p. 306. Kopp. C. R. 1863.

Il nous est facile de répondre à cette question, maintenant que nous avons nettement distingué les trois genres de travail accomplis par la chaleur dans l'intérieur d'un corps. La chaleur, nous le savons : 1° augmente la température, 2° surmonte les résistances intérieures et 3° les résistances extérieures. (*a*) Le premier travail produit la température, et posant $K =$ la quantité de chaleur requise par le corps pour s'échauffer de 1°, on a $K =$ *la capacité calorifique absolue* de la substance. Cette quantité doit conserver la même valeur à toutes les températures, car elle dépend seulement de l'inertie de l'atome, c'est-à-dire de sa masse. Donc, la quantité de chaleur absorbée par le corps pour s'élever d'un certain nombre de degrés sera $K(t_1 - t_0)$. (*b*) Le travail employé à vaincre les résistances intérieures est assez difficile à préciser, il est fonction composée de la cohésion et des autres propriétés physiques du corps ; nous nous sommes entendus sur ce point dans un chapitre précédent et nous avons représenté ce travail par $A\Lambda$. (*c*) Enfin le travail extérieur est exprimé par $Ap(V_1 - V_0)$.

Ces trois quantités de travail sont confondues en une seule dans la quantité désignée ordinairement par les physiciens sous le nom de *chaleur spécifique*, et si c représente ce nombre, on a :

$$c = K(t_1 - t_0) + A\Lambda + Ap(V_1 - V_0).$$

Il nous est généralement impossible d'isoler dans nos expériences les diverses parties de cette somme ; cependant certaines classes de substances se prêtent plus ou moins facilement à la détermination de quelques-unes de ces quantités.

Les gaz, par exemple, peuvent s'échauffer sous un volume constant, et alors le dernier terme de la somme c devient nul ; de même, pour les solides, on peut négliger cette même quantité par rapport aux autres. La dilatation

sensiblement uniforme de tous les gaz nous apprend que le travail intérieur dans ces substances est extrêmement faible, et si nous le regardons comme nul dans les gaz parfaits, nous serons autorisés à croire que, dans les gaz qui pour nous se rapprochent le plus de l'état gazeux théorique (hydrogène, oxygène, azote), le produit $P \times K$ pourra être constant.

L'équation précédente donne, en y supprimant la quantité AΛ :

$$K = \frac{c}{t_1 - t_0} - \frac{Ap(V_1 - V_0)}{t_1 - t_0}.$$

Si nous remplaçons dans cette expression les lettres par leurs valeurs, et désignant par α le coefficient de dilatation du gaz pour 1° de température et par δ le poids de 1 mètre cube de gaz, on aura :

$$K = c - \frac{\alpha}{\delta}\left(\frac{10333}{425}\right).$$

Ce nombre, multiplié par P, devra donner un produit constant si la théorie que nous développons est exacte.

M. Hirn a fait le calcul, et il a trouvé pour :

Oxygène.	$PK = 15,510$
Hydrogène.	$= 15,096$
Azote..	$= 15,069$

Les autres gaz fournissent un résultat qui s'approche d'autant plus des chiffres précédents, que les substances sont elles-mêmes plus voisines de l'état gazeux parfait. En prenant l'atome de l'hydrogène pour unité et en divisant par 2 celui de l'oxygène, on obtient $P \times K = 3,875$, et dès lors la loi de Dulong deviendrait exacte si au produit $P \times C$ on substituait celui-ci : $P \times K$.

Voyons quelles conséquences découlent de cette loi.

Admettant le produit $P \times K$ comme constant, et lui don-

nant la valeur moyenne que nous venons de fixer, on pourra se servir de ce résultat pour opérer sur un corps quelconque et calculer, par exemple, A, c'est-à-dire le travail intérieur. Cette détermination est facile dans le cas des solides, car on peut alors négliger la quantité toujours très-petite $Ap(V_1 - V_0)$.

Ces calculs ont été faits par M. Hirn, et voici un tableau tiré de son ouvrage[1] :

Substances.	AA = Travail intérieur exprimé en quantités de chaleur.	Capacité calorifique vulgaire.
Fer.	0,0696	0,1137
Nickel.	0,0681	0,1186
Cobalt.	0,0663	0,1069
Zinc.	0,0583	0,0955
Cuivre.	0,0573	0,0951
Sélénium.	0,0534	0,0837
Arsenic..	0,0295	0,0814
Palladium.	0,3367	0,0592
Étain..	0,0358	0,0562
Cadmium..	0,0352	0,0567
Argent.	0,0348	0,0571
Antimoine.	0,0322	0,0511
Or..	0,0202	0,0325
Platine..	0,0202	0,0324
Plomb.	5,0196	0,0314
Bismuth.	0,0198	0,0308
Eau.	0,6000	1,0000
Nitrate de potasse. . . .	0,1204	0,2587

On voit par là que d'une manière générale, dans tous les corps simples solides, les deux tiers environ de la chaleur communiquée à leur masse est employée à accomplir un travail intérieur, et le tiers restant à échauffer la substance. Pour l'eau, la chaleur absorbée par le travail intérieur est de $1{,}000 - 0{,}60 = 0{,}4$ de la chaleur totale !

Le rapport entre les deux quantités est maximum avec les corps les plus tenaces; ainsi, pour le fer, il est de

[1] Hirn, *Théorie mécanique de la chaleur*, première partie, p. 314.

1,65; pour le plomb, de 1,60; il augmente beaucoup dans le cas des corps composés, exemple le nitrate de potasse; mais, sur ce sujet, les déterminations ne sont pas encore assez nombreuses.

Les remarques précédentes font voir que la loi de Dulong et Petit est vraie en nature, et que les exceptions et les écarts résultent des perturbations causées par le travail intérieur que doit exécuter la chaleur dans les corps. On comprend en effet combien est grande l'influence du travail intérieur sur la capacité calorifique en voyant les deux tiers environ de la chaleur communiquée à un corps être absorbée par le travail moléculaire.

Cette loi nous apprend encore que l'action chimique ne modifie pas réellement la capacité calorifique des atomes, mais que sous ce rapport les combinaisons se comportent de même que de simples mélanges. Ce qui est modifié profondément alors, c'est le travail intérieur. En effet, s'il n'en était pas ainsi, la capacité obtenue par le calcul ne serait pas d'accord avec celle trouvée par l'observation directe, pour les corps gazeux, ainsi que M. Hirn l'a démontré. Enfin, au point de vue de la pratique, cette loi nous sera utile pour fixer le véritable nombre d'atomes d'une substance qui entrent dans une combinaison, question dont la solution est difficile et que les procédés de la chimie laissent souvent fort incertaine.

Une étude approfondie du sujet a conduit M. Hirn aux conclusions suivantes[1] : 1° Les atomes se combinent suivant deux modes distincts, ou bien les molécules se réunissent de manière à former de véritables mélanges, ou bien, au contraire, pour constituer une *unité indivise;* 2° Les atomes des corps dits élémentaires, se combinant entre eux, donnent souvent naissance à des *molécules* fonctionnant comme unités atomiques, eu égard à leurs propriétés

[1] Voyez Hirn, *Théorie mécanique de la chaleur*, p. 328.

thermiques; 3° Ces molécules peuvent se former ou au contraire se dédoubler lorsque le corps contracte une combinaison avec un autre.

Disons en passant que la considération des quantités de chaleur dégagée pendant la combinaison nous décidera par exemple à adopter C^4H^8 comme formule représentative d'un composé chimique, au lieu de $C^{40}H^{80}$, bien que dans les deux notations les rapports entre les quantités de matières combinées soient les mêmes; leur signification mécanique n'est pas la même, car à la seconde correspond un moindre dégagement de chaleur, et, par conséquent, les deux formules ne représentent ni le même agencement moléculaire, ni les mêmes distances atomiques.

Tels sont les résultats fournis par le calcul et l'observation; voyons quelles déductions nous pouvons en tirer relativement aux mouvements moléculaires.

Ces conséquences sont d'un grand intérêt. 1° Pour les substances qui suivent la loi de Dulong et Petit, les chaleurs spécifiques des masses chimiquement équivalentes sont égales; par conséquent, la même quantité de chaleur est nécessaire pour élever à la même température des masses très-différentes, c'est-à-dire les poids de ces substances représentant leurs équivalents. Ainsi, la quantité de chaleur qui porte à une température donnée 16 grammes de soufre produira le même effet sur 28 grammes de fer, 58 d'étain, 103,5 de plomb, car tels sont les équivalents de ces corps[1].

Réciproquement ne doivent être regardées comme *chimiquement équivalentes que les masses inversement proportionnelles à leur capacité calorifique absolue.* Ainsi on arrive à reconnaître un élément d'invariabilité et de permanence dans l'action de la force thermique, de même que l'on a reconnu pour d'autres forces l'invariabilité de la masse.

[1] Voyez Cantoni, *op. cit.*, p. 10.

Et le calorimètre devient entre les mains des chimistes un instrument de mesure aussi important que la balance. Nous verrons bientôt la confirmation de notre assertion.

2° Les derniers atomes des corps *d'une même classe* ont la même capacité calorique (remarque déjà indiquée plus haut). En effet, d'une part, la chaleur spécifique et le poids atomique étant en rapport inverse, d'autre part le poids atomique et le nombre des atomes renfermés sous des masses égales étant aussi en rapport inverse, il en résulte que le calorique spécifique est directement proportionnel au nombre des atomes, et par suite est le même pour un égal nombre d'entre eux [1].

3° Considérant que tous les corps regardés ordinairement comme simples ne donnent pas le même produit $P \times C$, certains chimistes distingués ont regardé plusieurs d'entre eux comme réellement composés, et à leur sens les différentes valeurs du produit $P \times C$ résulteraient du nombre variable des molécules dont ils sont formés. D'où l'on conclut que les forces dont nous disposons pour analyser les corps ne nous permettent pas d'arriver aux groupes moléculaires qui sont dissemblables dans les métaux et dans les autres substances [2]. Grosham admet, d'après des expériences délicates faites sur les vapeurs que le soufre, le brome, l'iode, le chlore sont des corps composés [3].

Finalement, abstraction faite du petit nombre des exceptions citées plus haut et en tenant compte de la faible variation subie par le produit $P \times C$, lorsque la composition des corps se complique (variation qui, pour des motifs dé-

[1] L'égalité $Pc = P'c'$ donne $\frac{c}{c'} = \frac{P'}{P}$, et à masses égales $m = Pn$, $m = P'n'$; on a $\frac{P'}{P} = \frac{n}{n'}$, et alors, à cause de la première, $\frac{c}{c'} = \frac{n}{n'}$; si $n = n'$, on a $c = c'$.

[2] Kopp., loco citato.

[3] B. V., *Arch. sc. physique*. 1863, vol. XVII, p. 41.

veloppés plus haut, doit être regardée seulement comme une perturbation de la loi générale), il devient évident que les capacités des corps simples restent constantes lorsqu'ils entrent en combinaison, et le même fait s'observe aussi lorsqu'un atome dit élémentaire se substitue à un autre, certainement composé, tel que le cyanogène ou l'ammonium.

Une conclusion toute naturelle découle de ces faits, à savoir que : pour élever à une égale température les divers atomes élémentaires, il faut la même quantité de force vive calorifique, qu'ils soient isolés ou combinés. Pour être rigoureusement vraie, cette loi exige de deux choses l'une, soit les molécules des corps dans un état de liberté complète et, par suite, toute la chaleur qui leur est fournie sert à élever leur température, soit une parfaite similitude de condition pour chacune d'entre elles. Il n'est donc pas étonnant de voir la loi de Dalton être vraie pour les gaz, corps dont les molécules sont dans une indépendance presque absolue; puis s'appliquer approximativement aux métaux, dont les molécules peuvent être regardées comme placées dans des conditions physiques de mobilité à peu près identiques, au moins dans les limites des expériences; notons cependant que, dans ces deux cas, les produits C P ne sont pas parfaitement égaux.

Ainsi la loi énoncée est exacte, en tant que loi limite, et, pour la vérifier sur tous les corps, il faudrait les prendre à un degré de cohésion également éloigné de leurs points de fusion et de volatilisation, en un mot, dans des conditions telles, qu'ils soient tous également sensibles aux influences des forces moléculaires. Or la science est bien loin de nous donner satisfaction sur ce point; il faut donc se borner à considérer la loi comme vraie théoriquement, mais soumise dans ses applications à des perturbations résultant des causes cités plus haut.

Cette manière de voir n'est pas une pure conjecture;

elle est assez rationnelle pour être admise comme un fait. Grosham[1] a trouvé que les densités des vapeurs des corps formés de carbone, d'hydrogène et d'oxygène ayant pour formule $C^p H^q O^r$ prises à pression égale et à température homologue, celle d'ébullition par exemple, sont en raison directe du nombre des atomes $p+q+r$. Il a indiqué les exceptions à cette loi et a déterminé les rapports assez simples entre les valeurs divergentes dans les différents groupes. Mais pour établir ces lois, il faut prendre pour point de départ la température $-273°$ qui est celle du zèro absolu. Je cite cet exemple particulier seulement afin de montrer la nécessité d'étudier les propriétés des corps en les plaçant dans des conditions semblables.

Nous pouvons donc admettre comme prouvé que les différentes valeurs des capacités calorifiques dépendent de la plus ou moins grande cohésion qui unit les dernières particules des corps; si les atomes étaient isolés ils auraient tous la même chaleur spécifique, c'est-à-dire qu'une quantité de chaleur donnée agissant sur un certain nombre d'atomes de corps simples ou composés, déterminerait une égale élévation de température. Dans la théorie dynamique de la chaleur, cela revient à dire qu'une action mécanique étant donnée, elle produira un travail égal en agissant sur les atomes de tous les corps, toutes les fois qu'elle aura seulement à vaincre l'inertie moléculaire. Or, les atomes ont des masses très-différentes les unes des autres, puisque leurs poids ne sont pas les mêmes, donc ils doivent, dans les conditions énoncées, prendre des vitesses extrêmement diverses. Et, si de la considération du travail nous passons à celle des pressions ou des forces virtuelles correspondantes pour estimer les intensités des chocs moléculaires, il en résulte que la même force doit imprimer aux molécules des vitesses inversement proportionnelles à

[1] *Arch. sc. physique*, loc. citat.

leurs masses. Ainsi la loi de Dulong et Petit fait rentrer les phénomènes de la capacité calorifique des corps dans les lois élémentaires de l'échange du mouvement entre mobiles. En d'autres termes, la loi $P \times K = P' \times K'$ revient à cette autre $m \times v = m' \times v'$. Donc on peut conclure que, conformément à une remarque faite depuis longtemps par les physiciens sur les gaz, la vitesse dont les molécules des différents corps sont animées à une température donnée, n'est pas la même dans tous : au contraire, elle est plus grande dans ceux qui ont la plus petite masse. D'après cela, il est possible d'expliquer la mobilité très-marquée des substances dont le poids atomique est le plus faible, tel que l'hydrogène, le carbone et leurs composés, c'est-à-dire les hydrocarbures. Peut-être aussi faut-il attribuer à la petitesse de la masse et à la grande intensité de la vitesse moléculaire l'infinie variété des composés formés par les corps dont les poids atomiques sont très-faibles : l'hydrogène, le carbone, l'azote par exemple, qui à eux seuls forment un nombre considérable de combinaisons, et en particulier, entrent dans la composition de toutes les substances organiques.

La loi étant posée, il faut étudier les exceptions. La principale est relative à l'influence de la structure moléculaire, ou encore de l'état solide ou liquide de la substance, car le poids P restant constant, le produit $P \times C$ varie non-seulement pour les diverses classes de substances, mais encore pour un même corps suivant ses conditions physiques ; exemple : le diamant donne 2,05 et le noir animal 3,13, l'eau 3,00 et la vapeur aqueuse 1,16[1]. Le plomb fondu donne 4,17 et solide 3,25, etc. Cependant les éléments sont les mêmes dans les deux cas, donc l'influence de l'état physique est manifeste.

[1] Hirn indique 37,5 et 14,2, mais ces nombres sont rapportés à $O = 100$.

L'explication de ces anomalies nous fournit l'occasion d'appliquer les principes exposés ci-dessus. Nous avons vu que la capacité des corps pour la chaleur dépend de la mobilité particulière des molécules et du travail à effectuer pour les séparer; par conséquent, elle change avec la puissance des liens physiques qui réunissent les molécules.

Donc le produit $P \times C$ doit varier sous l'influence de toutes les conditions capables de modifier le travail de désagrégation. Nous avons déjà reconnu que la différence entre les capacités des gaz sous volumes égaux et sous pression constante résultait d'un effet de ce genre.

Du reste, en traitant la question au point de vue de la mécanique pure, on reconnaît aisément que les divers corps, dans des conditions analogues, peuvent ne pas se comporter de même, car le moment d'inertie des molécules varie avec le mode de groupement de ces dernières.

Pour éclaircir ce point, il est bon de rappeler quelques principes relatifs au choc des corps animés de rotation :

1° Le choc d'un corps supposé dans les mêmes conditions que celles des atomes, c'est-à-dire animé de deux mouvements, l'un de rotation, et l'autre de translation, s'accomplit exactement comme s'il possédait un simple mouvement de rotation dont l'axe serait une ligne nommée en mécanique *axe spontané de rotation*, située à une certaine distance du véritable axe de rotation, lequel passe par le centre de gravité dans les corps complétement libres dans leur mouvement. Donc, dans la détermination des percussions réciproques des atomes en rotation, on peut rapporter celles-ci à cet axe spontané et faire complétement abstraction du mouvement de translation.

2° Le choc d'un corps en rotation se fait avec toute la force qu'il possède $m \times v$, dans le seul cas où la ligne de percussion passe par le centre de gravité, et, au contraire, toutes les fois que la percussion s'exercera d'une autre

manière, on n'aura d'autre percussion que celle qui est équivalente à une fraction de la masse[1].

Cette fraction est fonction de la quantité nommée en mécanique *moment d'inertie du corps*, laquelle dépend essentiellement de la figure même de ce corps. Donc, si dans un mobile animé d'un mouvement de rotation, le moment d'inertie vient à varier, l'intensité de la percussion produite par un point donné de ce corps variera nécessairement. Élucidons ce point à l'aide d'un exemple : supposons une verge en rotation dans un plan horizontal autour d'un axe vertical ; sur cette verge peuvent glisser très-librement deux boules traversées par elle, et retenues par un fil de façon à ce qu'elles restent en un point déterminé de la longueur de la verge; le tout étant disposé comme on a coutume de le faire pour les expériences relatives à la

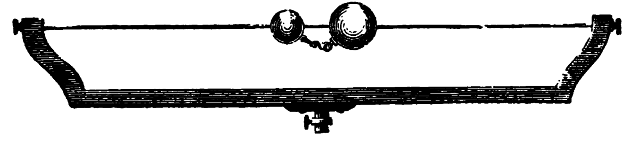


Fig. 9.

force centrifuge. Si, pendant la rotation uniforme de l'axe, on coupe le fil réunissant les deux sphères, leur distance augmentera aussitôt, en même temps la vitesse angulaire de la verge diminuera, le moment d'inertie du système variera, et un corps frappé par un même point de la verge métallique avant, puis après la rupture du fil aurait dans les deux cas reçu une impulsion différente. Supposons maintenant que les boules soient parfaitement libres d'abandonner la verge en rotation; elles s'échap-

[1] Voyez Poinsot, *op. cit.* p. 16 et 66, où il démontre que le choc maximum a lieu lorsqu'il s'exerce à une distance de l'axe spontané égale au bras d'inertie du corps estimé par rapport à ce même axe spontané.

peront suivant la tangente, et le choc que pourrait produire la verge mobile sera encore autre que celui observé dans les deux cas précédents. Donc, afin d'obtenir le même effet de percussion dans les trois cas, il aurait fallu dépenser une quantité différente de travail pour mettre le système en mouvement, et on peut véritablement dire que dans ces diverses circonstances la capacité du système pour la force n'a pas conservé une valeur constante. On sait très-bien, dans la pratique, comment on obtient dans les machines une grande régularité de mouvement à l'aide du pendule conique, lequel, pour recevoir une vitesse de rotation déterminée, absorbe une quantité de force variable avec l'écartement des boules et le moment d'inertie.

Ainsi donc, l'intensité du choc exercé par un corps en rotation dépend non-seulement de la masse et de la vitesse, mais encore du moment d'inertie par rapport à l'axe spontané de rotation; de même, l'intensité calorifique est fonction de la masse des molécules, de leur vitesse et enfin de la chaleur spécifique, ce dernier élément étant constitué, selon toute apparence, par le moment d'inertie par rapport à l'axe spontané. Les considérations développées présentement ne peuvent être regardées comme une explication des phénomènes observés dans les changements d'état; elles jettent un certain jour sur les particularités offertes par les diverses substances à mesure que leurs molécules acquièrent une plus complète liberté, ou tout au moins à mesure que faiblissent les liens qui les réunissent les unes contre les autres. Nous ne cherchons pas actuellement quelle est la nature de ces liens; cette question sera examinée ailleurs. Dans tous les cas, on doit admettre comme évident que si les distances entre molécules changent, les moments d'inertie changeront, et par suite il en sera de même de l'intensité des chocs qui produisent le calorique. Nous ne pouvons aller plus

loin, car nous ne connaissons pas la forme des molécules, ni celle de leurs groupes. On voit par là quelles difficultés rencontre l'application des principes généraux de la mécanique aux cas particuliers de la constitution des corps. Mais s'il ne nous est pas donné de traiter actuellement les questions aussi délicates, il ne faut pas cependant en conclure que la mécanique moléculaire des corps soit impossible à établir.

Jusqu'à présent, nous avons laissé de côté l'hypothèse de l'existence d'un milieu dans lequel les molécules du corps seraient immergées, et dont elles entraîneraient une partie dans leurs mouvements, suivant les partisans des tourbillons moléculaires. Si l'on admet l'existence de ce milieu, son action pourra être regardée comme équivalente au travail passif attribué aux forces moléculaires dans la théorie ordinaire. Lorsque plusieurs tourbillons se réuniront en un seul, le moment d'inertie, et, par suite, la rotation du système, seront évidemment modifiés. On voit donc que les considérations développées plus haut sont vraies pour tous les systèmes. A présent, il n'est pas à propos d'examiner ces suppositions, car la théorie mécanique est complètement indépendante des hypothèses causales qui ont été suggérées par des phénomènes d'un autre ordre.

Donc pour nous résumer et conclure nous pouvons reconnaître comme une loi *limite* naturelle que les différents atomes matériels, présentent une égale capacité pour la chaleur, mais que néanmoins les chaleurs spécifiques des systémes moléculaires peuvent être différentes. Les variations éprouvées par ce coefficient lors des changements d'état et des combinaisons chimiques, peuvent résulter d'une simple modification du moment d'inertie des molécules composées et du travail nécessaire pour vaincre les liens qui unissent leurs atomes constitutifs, on peut même admettre que ce travail est employé à donner

une nouvelle disposition aux diverses atmosphères distribuées autour des molécules.

Tout ce qui a été dit dans ce chapitre suppose la matière formée d'atomes distincts, fait surabondamment démontré par la chimie; et, s'il y avait encore quelques doutes sur ce point, il suffirait de remarquer que les lois exposées plus haut ne pouvant se comprendre en dehors de cette supposition, suffisent pour démontrer la vérité de l'hypothèse première.

CHAPITRE XIV

DU CALORIQUE DÉGAGÉ DANS LES ACTIONS CHIMIQUES

L'action chimique est de toutes les sources de mouvement une des plus puissantes qui soit à la disposition de l'homme. Elle nous fournit les puissants effets mécaniques utilisés dans l'art de la guerre et dans le travail des mines; elle est le principe du mouvement produit par les machines à feu, et c'est elle qui soutient l'activité des êtres vivants. Mais l'action chimique est une force dont la nature est environnée d'une complète obscurité, et dont le mode d'action est un profond mystère; et il faut tout d'abord examiner soigneusement quels phénomènes elle produit. Une seule chose nous est parfaitement connue, c'est qu'elle n'agit jamais à distance, et que le contact (au moins apparent) est une condition indispensable à son action. Lorsque nous avons étudié une force dont la nature nous était inconnue, il nous a fallu l'estimer d'après ses effets, il en sera de même pour l'action chimique, et le dégagement de chaleur étant précisément une de ses manifestations les plus constantes, nous devons d'abord rechercher quels rapports existent entre la chaleur produite et l'intensité de l'action chimique.

Jusqu'à présent, malgré les efforts des savants et des industriels, les rapports découverts entre les actions chimiques et les autres forces régissant la matière sont peu nombreux; cependant quelques relations ont été mises en lumière d'une façon satisfaisante, et peuvent être regardées comme des lois. Les premières recherches ayant trait à ce sujet furent celles entreprises par Rumford, Dalton et Dulong sur la combustion, phénomène d'une importance capitale dans les arts. Favre et Silberman ont récemment étendu ces investigations à un grand nombre de substances à l'aide de procédés opératoires très-délicats; et ils ont établi des principes qui, relativement aux recherches sur les quantités de mouvements moléculaires, sont aussi importants que les lois des proportions multiples et des équivalents dans les questions de masses et de poids.

Voici un premier fait et il est fondamental : *Lors d'une combinaison chimique, la quantité de chaleur est toujours la même; la valeur de cette quantité varie d'une combinaison à une autre.* Elle est indépendante de la rapidité de la combinaison; de sorte que l'oxydation d'une certaine substance se faisant violemment et avec production de lumière, dégage la même quantité de chaleur que si elle s'opérait lentement et sans phénomène lumineux; seulement, dans ce dernier cas, les causes de déperdition, étant très-difficiles à éviter, la quantité de chaleur semble être moindre que dans le premier, lorsqu'on se borne à un examen superficiel. Il en est de même dans les cas où le composé reste mélangé à un excès de l'un des corps prenant part à la réaction, par exemple dans les hydratations des acides, pour une certaine quantité du composé formé il se dégage une égale quantité de chaleur que la combinaison se fasse peu à peu ou d'un seul coup.

La formation des combinaisons les plus stables est accompagnée du dégagement d'une très-grande quantité

de chaleur, et, par suite, cette quantité diminue à mesure que le degré de la combinaison s'élève. Sous ce rapport, voici l'ordre suivant lequel on devrait sérier les substances combustibles, potassium, sodium, zinc, fer, plomb, cuivre, argent, et pour les corps comburants, c'est-à-dire les métalloïdes, l'échelle serait chlore, brome, oxygène, iode, soufre. L'eau formée d'hydrogène et d'oxygène n'est pas une des substances les plus stables, comme on le croyait encore récemment ; elle a été décomposée par Grove à des températures insuffisantes pour réduire l'oxyde de zinc, celui d'argent et quelques autres corps.

Cette sériation des corps ne permet pas encore, il s'en faut de beaucoup, d'établir une mesure exacte de l'intensité de l'action chimique. En outre, on n'a pas jusqu'ici fourni la raison de la diversité des poids atomiques ; de même il ne nous a pas encore été donné d'établir la loi de la variation des quantités de chaleur dégagées pendant les différentes combinaisons. Toutefois, comme l'on sait que les poids atomiques sont des multiples de celui d'une certaine substance (l'hydrogène), il n'est pas impossible que le nombre de calories dégagées pendant les diverses combinaisons soient des multiples de la quantité produite pendant une certaine d'entre elles. Woods a proposé de mesurer l'affinité chimique à l'aide de la quantité de chaleur développée pendant les combinaisons, et réunissant les résultats de ses propres recherches à ceux obtenus par Silbermann, il trouva que, pour un grand nombre de composés oxygénés, les quantités de chaleur dégagées par la combustion d'un équivalent chimique des diverses substances sont sensiblement multiples du nombre fourni par la combustion d'un équivalent d'iode. Ce résultat est peut-être un premier pas vers la découverte d'une loi, aussi doit-on lui accorder une grande importance.

Les lois se compliquent à mesure que le degré de la

combinaison s'élève. Aussi certains acides (azotique, chlorhydrique, bromhydrique, iodhydrique), lorsqu'ils se combinent avec la même base, produisent une égale quantité de chaleur ; d'autres au contraire, et parmi eux l'acide sulfurique, en produisent beaucoup plus; en somme, pour un même acide, la chaleur dégagée varie suivant la base avec laquelle il contracte une combinaison. Les faits relatifs à ce sujet ne sont pas encore très-nombreux ; ils suffisent néanmoins pour nous faire pressentir qu'ils peuvent tous être compris dans une même formule générale. Quelle est cette loi? Jusqu'ici on n'a pu le savoir, car elle est déguisée par diverses influences défavorables et surtout nous ne possédons pas un véritable terme de comparaison, mais assurément elle existe, l'observation suivante met la chose hors de conteste.

Lorsque deux sels neutres mélangés échangent leurs bases, la température ne s'élève pas toutes les fois que les nouveaux sels formés restent dissous dans les liqueurs, elle monte dans les seuls cas où l'un des deux se précipite à l'état solide ; le dégagement de chaleur est donc produit par le changement d'état, et puisque la température reste constante lorsqu'il ne se fait aucun précipité, on voit que la quantité de chaleur émise lors de la formation des nouveaux sels est précisément égale à celle absorbée pendant la décomposition des premiers. L'expérience dont nous parlons a pour analogue cette autre qui conduisit les chimistes à la notion des masses équivalentes, et dans laquelle on voit deux sels neutres produire par leur double décomposition deux autres sels neutres; en outre, il est bon de la rapprocher d'une troisième, celle qui nous a appris que les équivalents ont la même capacité calorifique. En un mot, il y a équivalence constante de travail de même qu'il y a équivalence de masse (Faure). Avec le calorimètre on mesure l'énergie, et la balance sert à mesurer la masse.

Suivant l'opinion reçue, la chaleur absorbée lors de la décomposition d'un composé chimique est égale à celle dégagée pendant sa formation. Nous avons déjà vu un exemple d'absorption de chaleur accompagnant une décomposition, en parlant de la dissociation de l'eau. Si, pour se décomposer, certaines substances demandent une température très-élevée, cela tient à ce que nous devons leur donner la chaleur nécessaire pour changer d'état, c'est-à-dire que nous devons leur fournir une vitesse moléculaire suffisante pour surmonter non-seulement les liens physiques, mais encore les liens chimiques qui les retiennent en combinaison. De plus, en sortant d'une combinaison chimique, un ou plusieurs des éléments de la combinaison ne conservent pas le même état physique. Donc, en déterminant la quantité de chaleur nécessaire à un corps pour se décomposer, il faudra tenir compte du nombre positif ou négatif de calories résultant de cette dernière transformation.

Il n'est pas rare d'observer des décompositions accompagnées d'un dégagement de chaleur; le plus souvent alors la chaleur s'explique par ce que, pendant la décomposition, certaines combinaisons se sont opérées entre corps doués d'une grande affinité (circonstances dans lesquelles la chaleur est produite en grande abondance comme nous l'avons dit plus haut); d'autres fois on peut attribuer l'élévation de température aux changements d'état survenus. Le premier cas se présente principalement pendant les décompositions des substances organiques donnant naissance à des composés plus fixes. Citons un exemple : la combustion du coton-poudre semble à première vue une décomposition, et elle en est une en effet, eu égard à la substance elle-même, composé assez complexe d'hydrogène, d'oxygène, de carbone et d'azote; mais en examinant les produits de la réaction, nous les trouvons formés par des corps très-stables, tels que l'eau, l'acide

carbonique, l'oxyde de carbone, dont la formation détermine le dégagement d'une quantité de chaleur notablement supérieure à celle absorbée par la mise en liberté de l'azote et la destruction du groupe moléculaire primitif. Les substances explosives sont comparables en quelque sorte à des masses gazeuses considérablement comprimées par l'effet des forces moléculaires elles-mêmes; or ces gaz peuvent contracter ensemble des combinaisons plus intimes sous l'influence de causes déterminantes spéciales; à ce moment, l'équilibre instable des molécules étant troublé, elles abandonnent l'état forcé dans lequel elles se trouvaient pour occuper une position plus stable. Le plus ordinairement, ces transformations sont excitées par l'élévation de la température d'un point de la masse. Le même raisonnement s'applique à la combustion de la poudre à canon, avec cette particularité que dans ce cas deux substances élémentaires, le soufre et le carbone, d'abord simplement mélangées et retenues par de faibles influences physiques, entrent en combinaison pendant l'explosion; il faut même tenir compte de l'hydrogène qui occupait les pores du charbon végétal employé à la fabrication de la poudre. Ces réactions supposent à la vérité la décomposition du nitre, mais elle absorbe une quantité de chaleur beaucoup inférieure à celle produite par la formation de l'eau, des sulfates, des carbonates, des sulfures de carbone et de potassium, etc. La différence pourrait même être connue en calculant les équivalents calorifiques de chacun des composés (chose qui n'a pas encore été faite, à ma connaissance).

Passons au second cas; quelquefois, en l'absence de toute action chimique, il se produit dans les corps un dégagement de chaleur sous la simple influence du passage d'un état moléculaire à un autre. Le fait se présente pour le phosphore, le soufre, et d'autres corps semblables. Le soufre en particulier, lorsque de prismatique il devient

octaédrique, manifeste une élévation de température de 12°; dans plusieurs décompositions chimiques, la chaleur dégagée peut être rattachée à un effet de ce genre; telles sont les décompositions de l'oxyde d'argent et de quelques oxydes métalliques, de l'eau oxygénée, etc. Cette façon de voir paraîtra encore plus exacte si l'on se rappelle que l'oxygène se présente sous deux formes, l'oxygène ordinaire et l'ozone. Enfin, dans les phénomènes de ce genre, il faut tenir compte non-seulement des changements isomériques, mais encore du degré de cohésion. Ainsi le charbon à l'état de diamant ne dégage pas en brûlant la même quantité de chaleur que s'il avait été pris sous la forme de charbon végétal. En présence de ces faits, il est difficile de décider si réellement une décomposition peut être source primitive de chaleur, car on peut toujours soupçonner l'existence de certaines actions capables de donner lieu à la manifestation thermique observée; nous laissons aux chimistes le soin de trancher la question.

De même qu'il existe un rapport constant entre les masses formant les divers degrés des combinaisons, de même il existe un rapport défini entre les quantités de chaleur dégagées dans les divers ordres de réactions chimiques. Cela est nettement établi par les recherches faites sur l'hydratation des acides, spécialement de l'acide sulfurique; et, de plus, par l'examen des composés ayant des formules chimiques analogues. Ainsi, en étudiant les carbures d'hydrogène de la formule $(C^2H^2)^n$, on a reconnu cette loi que les calories de combinaisons diminuaient de 37,5 chaque fois que les éléments du carbure (C^2H^2=4 vol.) entrent une fois de plus dans la constitution du nouveau composé[1]. Ajoutons toutefois que non-seulement les proportions relatives des éléments chimiques influent sur la

[1] Pour les faits nombreux cités ici, voir, outre les travaux originaux, le *Manuel de physique* de Cantoni, p. 547, et le *Traité de physique* de Daguin, t. II, p. 492; 2e édition.

quantité de chaleur de combinaison, mais encore la disposition des molécules; de telle sorte que les corps isomères, formés des mêmes éléments unis dans les mêmes proportions, produisent des quantités différentes de chaleur dans les combinaisons, car la disposition intérieure est différente dans chacun d'eux. Ce fait montre une fois de plus que non-seulement la quantité et la nature de la matière, mais aussi la distribution des molécules élémentaires d'un composé, influent beaucoup sur les propriétés physiques d'un corps et en particulier sur ses propriétés thermiques.

Nous ne pouvons et nous ne devons pas entrer dans le vaste domaine de la chimie, puisqu'il ne nous est pas donné de le parcourir; aussi les quelques indications fournies ci-dessus suffiront, je l'espère, pour montrer comment l'action chimique est une force comparable à toutes celles de la nature, c'est-à-dire une force mesurable, réductible à un travail moléculaire, et qui, de plus, a des rapports intimes avec le calorique. « L'affinité, dit Bunsen[1], en d'autres termes, la force en vertu de laquelle se réunissent les molécules de plusieurs éléments pour faire un corps composé, est, eu égard à sa nature et à son intensité, une grandeur finie, et, semblable en cela à toutes les autres forces de l'univers, elle ne peut être ni créée ni détruite. Aussi est-il inexact de dire que, dans certaines circonstances, tel corps possède une affinité, et que dans d'autres il la perd. Ces façons de parler, réduites à leur juste valeur, indiquent que dans certaines circonstances les corps sont libres d'obéir à l'attraction des forces chimiques, tandis que dans d'autres ils en sont empêchés par d'autres forces contrariant l'action des premières. Ces attractions antagonistes doivent être surmontées pour que la combinaison puisse s'opérer; elles peuvent donc être comparées en tous points aux frottements et aux ré-

[1] *Philos. Trans.*, 1857, p. 381.

sistances passives qui font obstacle à toute espèce de mouvement; tels sont pour le courant électrique la résistance des conducteurs métalliques, pour la propagation de la chaleur la résistance des métaux dont la conductibilité est plus ou moins grande, de même pour la transmission du magnétisme, etc. Nous surmontons ces résistances et nous favorisons les combinaisons à l'aide de l'agitation, de l'élévation de la température, de l'action auxiliaire d'un troisième corps agissant sans participer directement à la combinaison (action catalytique) à l'aide de la lumière diffuse ou solaire, » etc.

Le passage qui précède, emprunté aux œuvres de l'un des chimistes les plus distingués de notre époque, nous montre sous quel aspect on doit envisager l'affinité; il nous faut voir en elle une cause de mouvement dont l'action peut être soit contrariée par des frottements et des résistances, soit au contraire favorisée par des influences mécaniques très-variables; conséquemment on peut lui reconnaître une origine purement mécanique. Nous chercherons ailleurs à mettre cette théorie en pleine lumière, mais il est nécessaire d'étudier d'abord les diverses modalités sous lesquelles l'action chimique se manifeste, et pour cela nous allons examiner les autres affections de la matière.

Quelle que soit la cause des combinaisons entre corps hétérogènes dans tout phénomène de ce genre, plusieurs molécules de masse différente, abandonnant l'état de complète liberté pour concourir à la formation d'un nouveau composé, il est facile de montrer qu'un excès de force vive sera mise en disponibilité, laquelle force, ne pouvant s'anéantir, donnera naissance à un mouvement total de la masse, dont le résultat sera un dégagement de chaleur. En effet, d'après les faits exposés dans le chapitre précédent, les atomes élémentaires possèdent une égale capacité calorifique, et pour les divers équivalents chimiques, le produit de la masse par la vitesse demeure con-

stant; donc, lorsque les éléments sont séparés, on aura :

$$mv = m'v' = a.$$

Mais si, en vertu d'une action quelconque, plusieurs molécules élémentaires se réunissent en une molécule composée, celle-ci prendra une vitesse qui sera fonction des vitesses propres aux atomes élémentaires et dépendante de leurs masses. Soit u cette vitesse, d'après la loi du choc des corps non élastiques nous aurons, pour la molécule composée :

$$(m + m')\,u = 2a,$$

Car la quantité de mouvement du système n'a pas varié; en effet, il a été reconnu ci-dessus que le double mouvement de rotation et de translation moléculaire étant admis, cette quantité de mouvement reste constante. Mais en additionnant le travail ou force vive dans les deux cas, la somme est différente, car elle est avant la combinaison :

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{m'v'^2}{2} = \frac{1}{2}\left(\frac{m^2v^2}{m} + \frac{m'^2v'^2}{m'}\right)$$
$$= \frac{1}{2}\left(\frac{a^2}{m} + \frac{a^2}{m'}\right);$$

et après la combinaison elle est

$$\frac{(m + m')\,u^2}{2} = \frac{1}{2}\,\frac{(m + m')^2u^2}{m + m'} = \frac{1}{2}\,\frac{4a^2}{m + m'}.$$

La première de ces valeurs surpasse la seconde de

$$\frac{a^2}{2}\left[\frac{(m - m')^2}{mm'(m + m)}\right],$$

quantité nécessairement positive pour des masses quelconques. Ainsi, après la réunion de deux atomes hétérogènes, il y a mise en liberté d'une certaine force vive qui, par conséquent, devient disponible. Le théorème est applicable non-seulement aux réactions chimiques, mais

encore aux cas de juxtapositions moléculaires opérées par l'attraction dite homogène, toutes les fois que les masses formant un nouveau composé sont inégales; il sera donc vrai lorsque des molécules solides se réunissent à celles d'un liquide, ou bien encore lorsque les molécules d'un liquide en condensent d'autres provenant d'une vapeur.

Nous avons déjà indiqué plus haut[1] la raison de ce dégagement de force vive, en examinant la variation éprouvée par le moment d'inertie des corps pendant la réunion ou la séparation de leurs parties constitutives. De plus, il est à présumer que dans les réactions chimiques, le calorique dégagé dépend de la forme des molécules et de leurs moments d'inertie, comme cela se présente dans les cas d'attraction homogène. Lors de ces combinaisons, la vitesse de translation peut augmenter aux dépens de celle de rotation, transformation dont nous avons déjà eu des exemples en étudiant les changements d'état, et nous trouvons là très-vraisemblablement la raison pour laquelle, au point de thermique, le nombre des atomes participant à une réaction subit quelquefois des variations, deux atomes pouvant se fondre en un seul[2].

Certains chimistes ont rapporté au frottement des molécules le dégagement de chaleur qui accompagne les combinaisons chimiques, mais cette explication nous paraît inadmissible. En effet, le frottement étant simplement une partie du travail moteur qui dans nos machines devient travail résistant, nécessite constamment l'intervention d'une cause première; donc, dans le cas particulier des actions chimiques, le frottement ne peut être regardé comme principe initial de mouvement, puisque son existence suppose l'action préalable d'une force. Une semblable hypothèse nous enfermerait dans un cercle vicieux.

La plus violente agitation règne certainement dans une

[1] Voyez page 139.
[2] Voyez plus haut, p. 133.

masse matérielle au sein de laquelle s'accomplit une combinaison chimique, et il en résulte des frottements, si l'on veut conserver ce mot, ou, pour mieux dire, des vibrations. Or, celles-ci doivent avoir leur origine dans une force qui imprime aux molécules la vitesse nécessaire; comment donc expliquer l'existence de cette force si l'on imagine les molécules dépourvues de tout mouvement primordial?

Supposer les atomes en repos, c'est se condamner à imaginer tour à tour des forces tirées du néant, puis annihilées tout à coup; c'est admettre une série d'hypothèses absurdes.

Aux yeux de quelques autres savants, les phénomènes calorifiques, observés pendant les réactions chimiques, ne sont explicables dans la théorie mécanique qu'à la condition de les rattacher à des changements de capacité calorifique et à des variations de volumes; mais on peut voir, d'après les faits exposés jusqu'ici, la complète inutilité de semblables hypothèses. Assurément, lors d'une combinaison chimique, il s'opère dans les corps de notables changements, sinon elles seraient de simples mélanges. Voilà pourquoi l'ancienne théorie, tout en admettant l'action de forces spéciales, croyait également aux changements dus seulement à des réunions moléculaires de nouvelle formation. Mais en quoi consistent ces changements? A cette question il a été jusqu'ici impossible de répondre, car nous ne connaissons pas la nature intime des corps. Si à la constitution des corps prend part un fluide spécifique formant de petits tourbillons autour de chacune des molécules, on comprend comment une combinaison peut jeter un trouble complet dans les atmosphères des atomes élémentaires, et établir un nouveau régime dans celles des molécules composées; il se produira donc dans la masse à ce moment une grande agitation. De toute façon il serait prématuré de fonder une théorie avant d'avoir

étudié les phénomènes électriques et lumineux, dont l'influence sur les réactions chimiques est considérable, car cette étude nous fournira de précieuses connaissances.

Nous voulons actuellement faire remarquer une chose importante, c'est une certaine discontinuité *apparente*, facile à observer dans tous les phénomènes naturels. En effet, les changements ne se font pas par degrés insensibles, mais le phénomène paraît s'établir brusquement ; ainsi, lors de la solidification d'un liquide, les capacités calorifiques changent subitement. Semblable chose arrive pendant une réaction chimique. Il importe de chercher quelle est la cause de ces soubresauts[1] de la matière. Les brusques variations éprouvées par un corps en passant d'un état à un autre sont dues à des causes multiples : au moment de la liquéfaction, ils peuvent s'expliquer par la délimitation apportée à l'amplitude des mouvements de translation ; dans la solidification, rien n'empêche de les attribuer à l'orientation des axes et au changement du moment d'inertie des molécules.

La modification subite qui s'accomplit pendant une action chimique, est due certainement au moins en partie à des causes analogues : seulement l'effet porte sur des groupes moléculaires plus petits et de masse différente ; toutefois le phénomène paraît être un peu plus complexe. Ceux qui admettent les forces abstraites expliquent tous ces faits avec une grande facilité, en disant qu'ils dépendent de l'intensité des différentes forces d'affinité ; mais si l'on veut donner une raison vraiment physique des phénomènes, je ne crois pas qu'il soit possible de la trouver dans les principes exposés jusqu'ici.

Éclaircissons ce point théorique à l'aide d'un exemple.

[1] Ces discontinuités ne sont qu'apparentes, et évidemment ces sauts ne se produisent pas avec les divers éléments qui peuvent changer de condition par loi de continuité, mais avec leurs composés.

Parmi les phénomènes dus à l'action de force dont le mode d'action est parfaitement connu, nous voyons souvent se manifester des effets de discontinuité comparables à ceux dont il vient d'être question. La gravitation nous offre un cas de ce genre. Considérons un satellite tournant autour d'un astre central avec une vitesse telle que son orbe soit une ellipse : si la force de la projection augmente, l'ellipse deviendra successivement une parabole, puis une hyperbole, et alors le corps sera lancé à l'infini. Si, au contraire, la force de projection diminue progressivement, le satellite arrivera à décrire un cercle, et finira même par tomber sur le centre d'attraction. Ces cas extrêmes rompent la loi de continuité ; mais on doit remarquer qu'ils se manifestent lorsque la série de tous les états intermédiaires a été épuisée. Vraisemblablement il en est ainsi pour les divers cas de phénomènes limites, seulement les variations intermédiaires sont comprises entre des extrêmes très-rapprochés, et deviennent, par suite, plus difficiles à apprécier et à expliquer.

Nous reviendrons sur ce sujet lorsque nous aurons mieux examiné quelle est la nature de la matière. Il nous suffit, pour le moment, d'avoir reconnu les lois de l'affinité relativement à ses effets dynamiques ou calorifiques, et d'avoir indiqué comment, dans la théorie mécanique, on explique le dégagement de chaleur qui accompagne toute combinaison chimique, mais il reste toujours à chercher quelle est la cause déterminante de la combinaison des atomes, car toutes nos connaissances sur ce point sont insuffisantes.

Dans cette étude, il nous a fallu recourir aux termes : forces d'affinité, forces électives, forces attractives; expressions qui, à dire vrai, désignent simplement des propriétés occultes de la matière, et malgré la guerre déclarée par nous aux entités scientifiques, nous serons contraints encore pendant longtemps à employer les lo-

cutions consacrées. Ces façons de parler servent seulement à cacher notre ignorance, et, pour le dire franchement une fois pour toutes, « *elles ne sont que la représentation du fait à l'aide de termes convenus.* » Inutile de batailler sur ce point avant d'avoir recherché attentivement quelle est la constitution de la matière, et avant d'avoir fixé nos idées sur le point fondamental que voici : en outre de la matière tangible et pondérable, existe-t-il, oui ou non, un fluide coopérant aux phénomènes présentés par la matière commune? Nous consacrerons le livre suivant à cette question; maintenant il faut nous résumer.

CHAPITRE XV

RÉSUMÉ DU PREMIER LIVRE ET CONCLUSION GÉNÉRALE.

Dans les pages qui précèdent, nous avons exposé un nombre considérable de faits, en suivant une méthode plutôt analytique que synthétique et sans craindre de revenir plusieurs fois sur le même sujet. Essayons maintenant de dégager de toutes ces connaissances une hypothèse rationnelle sur la nature de l'agent physique produisant en nous la sensation du chaud, et de fonder une théorie non sur une conception *a priori*, mais sur l'observation des faits.

La conclusion naturelle de l'étude à laquelle nous nous sommes livré jusqu'ici peut se formuler ainsi : *le calorique est un mode du mouvement de la matière.* Le calorique se manifestant dans tous les corps, toutes les molécules matérielles sont nécessairement animées de mouvement; lequel est principe de cette activité de la matière, nommée chaleur? Les faits les plus vulgaires nous montrent la transformation alternative du travail mécanique en cha-

leur, et de la chaleur en travail. Le mouvement des corps, cessant comme déplacement total de la masse, se continue comme vibration moléculaire, et *vice versa*. La dilatation des corps, et spécialement des gaz, est l'intermédiaire ordinaire de ces phénomènes réciproques; le travail produit par le mouvement intérieur des molécules gazeuses est même utilisé dans nos machines pour mouvoir des poids plus ou moins grands; et dans toutes les transformations de ce genre, il se produit une perte de calorique équivalente au travail produit.

Quant à la nature du mouvement intime des corps, les atomes étant invisibles, il nous est complétement impossible de la déterminer par l'examen direct, mais l'ensemble des faits indique une agitation continuelle des parties élémentaires se faisant tantôt suivant des courbes fermées, tantôt suivant des lignes indéfinies, comme il arrive dans un véritable mouvement de projection, et on peut établir, en thèse générale, que toutes les molécules des corps sont animées d'un double mouvement simultané de translation et de rotation. La *température* des corps est un phénomène dépendant de l'intensité du choc des molécules, et, par suite de leur masse et de leur vitesse, elle se mesure d'après l'augmentation du volume des corps, c'est-à-dire l'écartement plus ou moins grand de leurs parties intégrantes; par conséquent, sa mesure revient à celle d'un véritable travail, accompli par les molécules elles-mêmes; donc elle est représentée par la moitié de la force vive qui anime le système, puisqu'il en est ainsi pour tous les autres genres de travail mécanique. Le travail de dilatation est double : il est à la fois intérieur et extérieur; en vertu du premier (l'*intérieur*) se fait l'augmentation de volume des corps et s'accroît la vites e des molécules; le second (l'*extérieur*) repousse les obstacles qui peuvent s'opposer à la dilatation.

Le travail intérieur est toujours en antagonisme avec les

liens qui réunissent les diverses parties des corps, et quelle que soit l'origine et la nature de ceux-ci, les effets produits par la chaleur sont toujours proportionnels au travail à effectuer pour les détruire, et, par suite, au mouvement imprimé à la substance estimé d'après la quantité de force vive correspondante.

La théorie qui regarde le calorique comme un mouvement, rend parfaitement compte des divers états physiques de la matière et des phénomènes accompagnant le passage des corps de l'un de ces états à l'autre; dans cette manière de voir, l'absorption de chaleur dont s'accompagnent la fusion et la vaporisation est considérée comme une transformation de mouvement ayant pour effet d'éloigner les molécules réunies les unes aux autres et de leur communiquer une certaine vitesse de projection suivant des orbites plus ou moins bien limitées, réciproquement il est aisé de comprendre pourquoi cette force est mise en liberté dans les changements d'états inverse des précédents.

En cherchant les lois des échanges de chaleur, nous avons découvert une relation fort remarquable entre les masses des équivalents chimiques des corps et les quantités de calorique nécessaires pour produire une égale tension calorifique dans ces mêmes corps. Voici sur ce sujet les conclusions auxquelles nous nous sommes arrêtés : 1° les atomes libres et isolés présentent une égale facilité au mouvement, et 2° ils sont soumis au grand principe mécanique qui régit les échanges de mouvement en vertu duquel il y a constamment proportion inverse entre la vitesse et les masses. Nous avons reconnu combien étaient justes les idées modernes sur l'expansibilité gazeuse, et quelle utilité peut avoir la théorie mécanique dans l'étude des diverses propriétés physiques des corps. Ici même un vaste champ est ouvert aux recherches des savants désireux d'examiner les propriétés moléculaires à ce nouveau

point de vue. De nombreuses lacunes ont été rencontrées chemin faisant; elles seront promptement comblées par le zèle des expérimentateurs, il faut l'espérer du moins, et l'auteur de ce livre s'estimera heureux si le présent travail peut appeler l'attention des chercheurs sur ces desiderata scientifiques.

Jusque-là peu nous importait le mode de production du calorique, et nous pouvions le concevoir engendré simplement par des actions mécaniques; mais cet agent prend aussi naissance dans d'autres conditions, par exemple dans les combinaisons chimiques; l'étude de la corrélation des forces naturelles nous a donc conduit nécessairement à examiner quel rapport existe entre les réactions chimiques et les dégagements de chaleur concomitants. Nous avons alors reconnu deux lois capitales :

1° L'*action chimique est une action définie*, autrement dit une certaine quantité d'action chimique produit toujours une égale quantité de calorique;

2° Il existe une étroite relation entre les équivalents des composés de divers ordres et la quantité de chaleur dégagée lors de leur formation.

Ces lois, tout imparfaites qu'elles sont, nous montrent cependant que les actions chimiques, elles aussi, obéissent à une loi mécanique dont l'origine pourrait bien être la simple réunion de masses diverses, mais douées d'une égale quantité de mouvement, lesquelles, faute d'élasticité dans leur choc, dégagent une certaine quantité de force vive.

Ainsi, pour expliquer tous les phénomènes calorifiques, l'inertie et le mouvement suffisent. Les forces élastiques elles-mêmes, sans être regardées par nous comme complétement secondaires, ne sont pas, à notre avis, des forces primitives, la simple rotation des atomes pouvant produire des effets en tout comparables à ceux de l'élasticité. Le problème que nous nous étions proposé est donc

résolu : nous avons montré que *les phénomènes calorifiques peuvent être ramenés à de véritables transformations de mouvement* et qu'il n'est pas nécessaire de recourir à de nouveaux principes pour les expliquer.

Cette théorie est indépendante de toute idée préconçue sur la nature des liens moléculaires antagonistes du calorique. L'agrégation des molécules peut être attribuée à des causes diverses, à une force *sui generis* propre aux atomes ou à l'action extérieure d'un milieu. Le premier système est plus commode, mais il n'explique rien, puisqu'il se borne à admettre l'existence de forces spéciales dans chaque cas particulier; le second s'efforce, au contraire, d'expliquer les phénomènes à l'aide des lois physiques du mouvement. Que l'on adopte l'une ou l'autre de ces deux hypothèses, la théorie mécanique est toujours vraie, car elle s'appuie seulement sur les communications de mouvement, et, de plus, elle est complétement indépendante des idées métaphysiques proposées par certains physiciens pour expliquer la cause primordiale du mouvement. A ceux qui nous objecteraient que la nouvelle théorie renverse par la base les principes de certaines écoles, nous répondrons que notre intention n'est pas de fournir appui à ces doctrines, un pareil soin appartenant à leurs défenseurs.

Qu'il nous soit même permis de faire à ce sujet une petite réflexion. Pour peu que l'on songe à l'immense quantité de faits dont la réunion et la coordination ont dû être faites soigneusement avant d'arriver à en déduire les quelques principes formulés plus haut, on ne peut s'empêcher d'être pris d'étonnement (nous ne voulons pas dire plus) lorsqu'on voit certains physiciens assez hardis pour trancher les questions en s'appuyant sur des théories *a priori*, et on s'estime heureux de voir les véritables savants suivre avec ardeur la voie pénible de l'observation. Les beaux résultats déjà acquis à la science, et ceux plus grands encore que l'on est en droit d'espérer, doivent encourager

les physiciens à expérimenter sans relâche et à se livrer aux spéculations théoriques seulement pour reconnaître les lacunes laissées par leurs devanciers et susciter de nouvelles recherches.

Si maintenant on veut pousser plus avant la recherche des rapports du calorique avec les autres forces de la nature, on se trouvera arrêté par de graves et nombreuses difficultés, à cause de notre ignorance complète touchant la constitution intime des corps. Ici même, pour connaître tout à fait le mode d'action du calorique, nous avons fréquemment éprouvé le besoin de savoir quelles sont ces forces antagonistes dont la cohésion est l'expression. Afin de dissiper toutes les ténèbres de ces problèmes, il est nécessaire de rechercher, en premier lieu, s'il existe ou non un milieu universel imprégnant et enveloppant tous les corps, et de déterminer quelle est sa part d'action dans les phénomènes naturels.

L'optique, l'électricité, nous permettront de répondre à cette question, et leur étude établira la théorie de la chaleur sur des preuves non moins solides que celles ayant pour base la considération de l'équivalent mécanique de la chaleur. En effet, il résulte de nos premières recherches que la chaleur est le résultat d'une transformation de mouvement; mais en quoi consiste cette transformation? Tel est le point à éclaircir par de nouvelles investigations. En effet, la réflexion suivante se présente tout naturellement à l'esprit : entre le salaire d'un ouvrier et le temps de son travail, existe un rapport, un coefficient constant; cependant nous ne disons pas : le temps *est* de l'argent; de même nous ne pouvons identifier chaleur et mouvement par la seule considération de leur équipollence; en outre, il nous faut connaître le mode suivant lequel s'opère la transformation des divers genres de mouvements en calorique.

La découverte de l'équivalent mécanique de la chaleur est une donnée expérimentale établissant empiriquement

la permanence du mouvement, ou son indestructibilité, au même titre que les expériences de Lavoisier ont démontré l'indestructibilité de la matière. Elle a fourni une base solide sur laquelle l'analyse mathématique a pu édifier ses formules ; et celles-ci, par leurs développements successifs, ont permis de constater la justesse du principe fondamental dans des circonstances peu accessibles à l'expérimentation directe ; tel est, du reste, le très-grand et très-réel avantage des mathématiques. Ces travaux théoriques forment un des plus beaux monuments de la science physico-mathématique de notre époque ; et au point de vue de leur importance ils soutiennent la comparaison avec ceux de la mécanique céleste, de l'optique et de l'électro-dynamie ; mais nous ne sommes pas dans l'intention de les développer ici.

Certains phénomènes examinés superficiellement nous font croire très-souvent que les forces naturelles s'anéantissent alors qu'elles ne font que se transformer. Un corps est-il immergé dans l'eau, il perd une partie de son poids égale à celui du volume de liquide déplacé ; est-ce à dire que la pesanteur abandonne ses droits? Non assurément, car si le corps paraît moins lourd à la main qui le soutient, de son côté le poids du vase renfermant l'eau augmente d'une quantité correspondante, chose facile à vérifier par expérience. De même encore, dans un baromètre la colonne de mercure soutenue par l'atmosphère ne produit aucune pression sur le fond de la cuvette; mais si le tube est attaché à un support, ce dernier aura à soutenir une charge égale au poids de mercure contenu dans le tube barométrique, comme le prouve le baromètre à balance. Donc, souvent pour des yeux inexpérimentés les forces de la nature semblent perdre toute leur action, et cependant elles ne font que changer de forme; il appartient alors à la science de rendre aux faits leur véritable signification.

Dans ce premier livre, plusieurs questions n'ont pas

reçu une solution rigoureuse, car nous n'avions pas les éléments nécessaires pour traiter complétement ces problèmes. En parlant de la lumière nous compléterons nos connaissances et nous serons à même de dissiper toutes les incertitudes sur la nature de la chaleur.

Grâce aux connaissances que nous fournira l'étude des phénomènes lumineux, ces mouvements atomiques, qui échappent complétement aux yeux du corps, prendront une figure devant les yeux de l'esprit. Aussi le physicien qui traiterait de la chaleur sans tirer profit des immenses ressources que lui offre l'optique serait dans les conditions d'un observateur qui entreprendrait d'explorer la nature sans jamais recourir au sens de la vue. La seconde partie de cet ouvrage sera donc consacrée à résumer les faits principaux de l'optique.

LIVRE II

DE LA LUMIÈRE

CHAPITRE PREMIER

PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX DUS AUX RADIATIONS LUMINEUSES.
PLURALITÉ DES RADIATIONS.

La lumière, considérée pendant très-longtemps comme un agent destiné exclusivement à mettre les êtres animés en relation avec l'univers, par l'intermédiaire du sens de la vue, est aujourd'hui comptée parmi les forces les plus puissantes de la nature. Le plus souvent elle coexiste avec la chaleur rayonnante. Aussi tantôt a-t-on admis une identité complète entre la chaleur et la lumière ; tantôt, au contraire, on a soutenu que ces deux manifestations naturelles étaient parfaitement distinctes, puis aussi on est arrivé à constater dans les rayons lumineux une action thermique et une action éclairante. J.-B. Porta, le premier, observa l'image aérienne formée dans une chambre obscure, trois cents ans plus tard, Daguerre trouva le moyen de fixer cette image sur une plaque argentée ; enfin un siècle avant cette magnifique découverte, les botanistes avaient noté l'influence de la lumière sur la végétation. L'homme est donc arrivé peu à peu à reconnaître dans les radiations émanées de l'astre central de notre système planétaire, une force énergique qui incessamment modifie la matière pondérable, et dont il peut tirer d'innombrables et merveilleuses applications.

En effet, si nos vaisseaux sillonnent les mers sous l'im-

pulsion des vents, la cause en est au soleil, dont les rayons maintiennent notre atmosphère en mouvement ; si les cours d'eau animent nos usines et entretiennent la vie des végétaux dans nos prairies, ils le doivent à la radiation solaire qui, par l'évaporation, élève dans les airs la vapeur d'eau des océans, puis la vapeur se condense dans les hautes régions de l'atmosphère ; si le feu nous rend tout-puissants à l'aide de nos machines à vapeur, il tient cette faculté de la lumière qui a décomposé l'acide carbonique et l'a transformé en *dépôts de force*. Le moyen le plus énergique dont la science pendant longtemps disposa exclusivement pour fondre, volatiliser et décomposer les corps extrêmement réfractaires, fut la concentration des rayons solaires au foyer des lentilles et des miroirs. Aujourd'hui le physicien emploie très-souvent un rayon de lumière pour analyser les corps, pour découvrir leur structure intime, et nous aurons même à fournir quelques indications sur ces questions intéressantes. L'importance du rayonnement lumineux s'accroît encore lorsqu'on envisage ses rapports avec les autres forces de la nature, et nous devons reconnaître à la cause qui lui donne naissance une influence de premier ordre dans le mécanisme de la création ; ainsi se confirme cette notion vaguement exprimée par Kepler dans les premières pages de son livre sur l'optique, où il dit : « Tous les phénomènes de la nature doivent être rapportés au principe de la lumière. »

Il n'entre pas dans notre plan de faire un traité complet sur la lumière, nous voulons seulement esquisser les faits indispensables pour reconnaître la nature de cet agent, et nous mettre à même de traiter plus à fond les problèmes laissés sans solution dans le chapitre précédent.

Les trois formes de la radiation, lumineuse, calorifique et chimique sont rendues évidentes dans l'expérience de la *dispersion* de la lumière, c'est-à-dire de sa décomposition par le prisme triangulaire. En effet, le spectre

obtenu impressionne l'œil par ses vives couleurs échauffe un thermoscope, et noircit un papier imprégné de chlorure d'argent ; mais ces actions diverses n'ont pas la même énergie dans toutes les régions du spectre. La figure 10 nous montre l'étendue et la courbe d'intensité de ces radiations. La lumière est à son maximum dans le jaune; la courbe AMH traduit la loi de l'intensité lumineuse; le maximum de chaleur est situé dans la partie obscure située au delà du rouge ; avec la lumière solaire, la courbe calorifique est BDN, et, pour la lumière électrique, elle est représentée par PRN. L'action chimique a son maximum dans le violet et plus encore dans la région obscure confinant au violet ; la courbe KL figure la variation de l'intensité chimique. Cette expérience nous fait apprécier toute l'insuffisance de l'œil pour constater l'existence d'un grand nombre de rayons placés aux deux extrémités du spectre auxquels notre rétine reste complétement insensible.

Les différentes radiations se rencontrent en proportion variable dans la lumière émise par chacune des substances terrestres portées à un degré convenable de température, comme on peut le voir par la courbe PRN qui représente la chaleur dans la lumière électrique. En général, les corps, lorsqu'ils s'échauffent, commencent à émettre des radiations obscures; celles-ci, peu à peu, deviennent lumineuses, c'est-à-dire capables d'ébranler la rétine; ce phénomène se produit vers 600 environ. Si la température est portée à un degré très-élevé, l'activité chimique des rayons et l'intensité lumineuse seront très-développées, de telle sorte que, sous ce double rapport, on obtient l'effet maximum à l'aide de la lumière électrique, dans laquelle en même temps le dégagement de chaleur est des plus considérables. Les vibrations extrêmes propres aux corps ayant une basse température, manquent dans les rayons solaires, car elles sont absorbées par l'at-

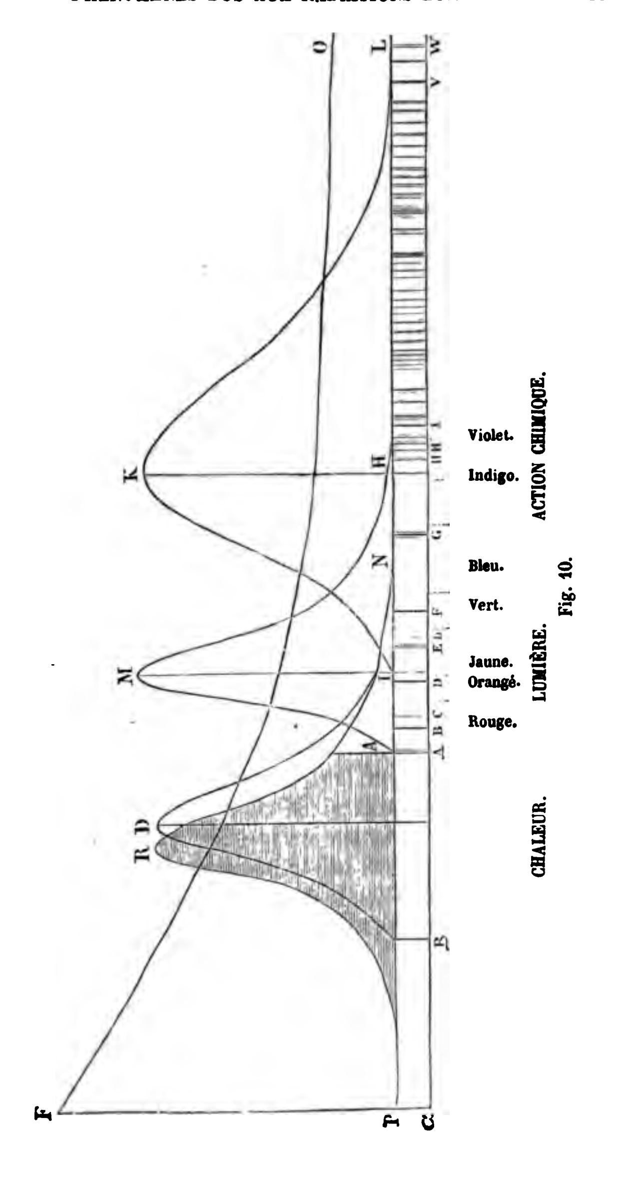

Violet.
Indigo.
Bleu.
Vert.
Jaune.
Orangé.
Rouge.
ACTION CHIMIQUE.
LUMIÈRE.
CHALEUR.

Fig. 10.

de Melloni; celles-ci démontrèrent en effet que des substances parfaitement transparentes pour la lumière absorbent d'une manière très-inégale les rayons calorifiques, et produisent un effet analogue à celui des milieux colorés sur la lumière. Ainsi, en employant un prisme de verre rouge, puis un autre de verre vert, on obtient le maximum d'intensité éclairante en des points différents du spectre; il en arrive de même aux rayons calorifiques lorsqu'ils traversent les différents milieux. Le sel gemme fait exception, car il est le seul corps à la fois incolore et *athermocroïque*. Une étude plus approfondie du spectre, faite par le physicien dont nous rappelons les travaux, lui a montré que si l'on employait un prisme de sel gemme, le maximum de chaleur se trouve toujours du côté du rouge, et notablement en dehors; pour la lumière du soleil, il est placé dans un espace obscur complétement distinct de la partie colorée, à une distance de celle-ci à peu près égale à celle qui, dans le sens opposé, sépare le rouge du jaune[1]; de plus, en tenant compte de la condensation des rayons dans cette partie du spectre, on peut dire que les maximum thermique et chimique sont équidistants du milieu du spectre, chacun d'eux occupant une extrémité.

Si, sur un spectre ordinaire, on élève en ses divers points des ordonnées d'une longueur proportionnelle aux valeurs de l'intensité calorifique correspondant d'après Melloni à ces points, on constate que les extrémités des perpendiculaires forment une ligne courbe. Mais en répétaut la même opération sur le spectre obtenu à l'aide des réticules, on obtient une ligne droite inclinée sur l'axe des ordonnées; le plus grand écartement des deux lignes correspond à l'espace obscur indiqué, et il va en diminuant jusqu'au violet. On peut donc conclure de là qu'après avoir passé par un maximum, l'intensité calorifique décroît régulièrement d'une ex-

[1] Melloni, mém. cit. Voyez aussi la figure 10, p. 165.

trémité à l'autre du spectre. Or, parmi les substances capables d'absorber les rayons, se trouvent les gaz des atmosphères solaire et terrestre, et dans cette dernière on doit noter spécialement la vapeur d'eau, dont le pouvoir absorbant est assez considérable; donc, la lumière solaire doit nous arriver privée de tous les rayons qui peuvent être retenus par les corps portés à une température peu élevée; aussi la valeur de la radiation obscure augmenterait-elle très-notablement si on tenait compte de la portion interceptée.

Les rayons chimiques présentent des phénomènes du même genre, leur quantité, leur dissémination, et la position du maximum d'intensité, varient avec la nature du prisme; la dispersion est aussi grande que possible avec un prisme en quartz, et on peut avoir, sur les papiers sensibles, une impression photographique s'étendant au delà du violet, à une distance qui égale la longueur entière du spectre visible[1].

Le plus souvent les rayons chimiques ne sont pas visibles directement; mais ils le deviennent en recevant le spectre sur un papier qui a été trempé dans une infusion de marron d'Inde (*æsculus hippocastanum*), ou dans de l'eau acidulée avec l'acide sulfurique et tenant du sulfate de quinine en dissolution. Les papiers ainsi préparés peuvent être remplacés par une lame de verre d'urane. Ces faits nous montrent que la matière ne répond pas également aux diverses espèces de radiations, et ils sont analogues à ceux que nous offrent les étoffes de couleur. Elles brillent d'un vif éclat lorsqu'elles sont éclairées par des rayons d'une teinte homologue à la leur, tandis qu'elles deviennent à peine visibles si la lumière est de teinte opposée[2].

[1] Voyez Bunsen et Roscoe, *Philos. Trans.*, 1859, part. II.

[2] Les personnes les moins initiées à l'étude de la physique comprennent parfaitement qu'il doit exister une certaine différence entre la chaleur solaire et celle de nos sources calorifiques ordinaires. Je

de Melloni; celles-ci démontrèrent e… manifeste que
stances parfaitement transparentes… genres de radia-
bent d'une manière très-inégale… la modalité parti-
et produisent un effet analogue… l'impression de la
sur la lumière. Ainsi, en e… aie hétérogénéité des
rouge, puis un autre de v… le principe est unique;
d'intensité éclairante e… ère en influençant la ré-
il en arrive de même … s'il rencontre un composé
versent les différent… re cas, il y a toujours un effet
car il est le seul … itant. On a cru cependant observer
Une étude plus … stances une production de lumière
cien dont no… is alors on était abusé par le défaut de
l'on emplo… les instruments, car la lumière et la chaleur
leur se … rables; la lumière étant simplement « *une série*
en de… *calorifiques appréciables par l'organe de la vue*,
esp… *roquement les rayons de chaleur obscure et les*
à … *chimiques étant des radiations lumineuses invisi-*
… » Cette façon d'envisager les rayons chimiques est
parfaitement confirmée par une expérience curieuse : la
reproduction photographique de dessins invisibles.

Ainsi il est évident que la nature d'un des éléments constitutifs du spectre une fois connue, il en sera de même pour tous les autres, et par suite le mot lumière nous servira souvent à désigner l'ensemble de ces trois radiations.

voyais un jour dans la campagne un mécanicien anglais souffrir beaucoup de la chaleur du soleil, lui qui était habitué à la température très-élevée de la cale des machines dans les navires à vapeur; et, comme je m'en étonnais, il me répondit avec beaucoup de justesse: « *It is a quite different heat* » (C'est une chaleur très-différente). En effet, la différence existe réellement, car la chaleur solaire est accompagnée de rayons chimiques pouvant agir sur les animaux au point de changer la couleur de leur peau; et les lumières artificielles, la lumière électrique, par exemple, agissent de même, seulement avec une énergie proportionnelle à la quantité des rayons chimiques. La sensation pénible causée par la chaleur solaire est comparable à celle que nous éprouvons lorsque notre oreille vient à être déchirée par des sons très-aigus.

[1] Melloni, *loc. cit.* à la fin.

Les rayons qui produisent la lumière ont été mieux étudiés que les autres, cela à cause de la facilité avec laquelle l'organe de la vue, grâce à sa délicatesse extrême, se prête à l'examen de leurs plus légères modifications, et les notions acquises à leur sujet ont permis de rechercher la nature des autres parties spectrales; mais assurément on aurait pu commencer ces recherches sur l'une quelconque des trois variétés de radiations, si notre œil avait pour les rayons chimiques et calorifiques la même sensibilité que pour les rayons éclairants.

La lumière étant envisagée à ce point de vue très-général, l'importance accordée jusqu'ici à l'action optique de la lumière a beaucoup diminué. En effet, non-seulement la lumière existerait en l'absence de tout organe visuel impressionné par elle, mais elle continuerait à jouer un rôle considérable dans la nature en déterminant les effets calorifiques et chimiques. Le phénomène de la vision, grâce à l'intermédiaire de la lumière, est admirable en ce que l'auteur de la nature a établi ainsi la communication des êtres animés avec le reste de la création par un moyen des plus simples et des plus ingénieux : la formation d'une image au fond de l'œil. Ce fait est pour nous de la plus haute valeur, car nous lui devons une très-grande partie de notre bien-être, et cependant le physicien doit regarder le pouvoir éclairant de la lumière comme une propriété secondaire d'un agent qui tient sous sa dépendance des phénomènes plus nombreux. Il en est de même des sons; ils sont dus au fait général de la vibration des corps, laquelle peut agiter le sable étendu sur une plaque, et mettre des cordes en mouvement alors même que notre oreille ne perçoit aucun son. L'impression plus ou moins lumineuse d'une radiation sur la rétine est complétement indépendante des autres effets physiques qu'elle est apte à susciter, et rien n'empêche d'admettre une inégale impressionnabilité à la lumière chez les divers animaux.

Bien plus, à l'appui de cette hypothèse on peut citer le fait très-connu du daltonisme, anomalie de la vision dans laquelle les sujets affectés sont incapables de percevoir certaines couleurs, ou bien, si la perception existe, ils ne les distinguent pas les unes des autres, le rouge est confondu avec le vert, etc. Or, Melloni fait remarquer à ce propos que si la vision des couleurs dépendait d'une propriété inhérente au rayon et non d'une modification spéciale de l'œil, on arriverait à cette conclusion absurde d'un rayon visible et invisible en même temps.

On voit ainsi combien il est dangereux d'établir sur la nature des agents physiques des théories ayant nos sensations pour base, et sous ce rapport nulle histoire n'est plus instructive que celle de l'optique. Combien de systèmes ne furent pas proposés à seule fin d'expliquer la vision! Les uns admettaient une force visuelle spéciale à l'organe de la vue; de l'œil partaient des rayons qui allaient en ligne droite se mettre en contact avec les objets. Les autres disaient que la vision s'opérait à l'aide de petites images lancées dans tous les sens par les objets; ceux-ci regardaient la vision comme instantanée, ceux-là comme successive, puis on supposait tantôt qu'elle s'opérait dans une certaine partie de l'œil, tantôt dans une autre. Toutes les incertitudes s'évanouirent lorsque le mécanisme de l'œil fut connu et que Scheiner fit voir l'image des objets extérieurs se dessinant sur le fond de l'œil des animaux de même que sur le verre dépoli d'une chambre obscure. A la vérité un vaste problème psychologique restait à résoudre : comment la sensation est-elle extériorée? et alors on se demanda si la vue seule, sans le secours du toucher, suffisait pour nous donner une notion exacte des objets extérieurs[1], mais mal-

[1] Lisez, dans les *Trans. philos.*, 1841, p. I, l'observation d'un aveugle par cataracte congéniale, habitué à reconnaître les solides géométriques au toucher, qui, ayant recouvré la vue à la suite d'une opération, ne sut point distinguer un cube d'une sphère lorsqu'ils

gré ces difficultés d'ordre métaphysique, l'hypothèse d'une force spéciale produisant la vision disparut pour toujours. La question rentra ainsi dans la série des faits connus. Les théories sur la nature de la lumière pouvaient varier dorénavant, la vision restait expliquée sans qu'il fût nécessaire de recourir à une force d'une espèce nouvelle.

Puisque nous reconnaissons à la lumière une influence des plus considérables; il devient très-important de rechercher en quoi elle consiste ; tel est le sujet que nous allons examiner actuellement.

CHAPITRE II

DES DIVERSES THÉORIES DE LA LUMIÈRE. — SYSTÈME DE L'ÉMISSION.

La lumière est le mouvement d'une certaine substance : toutes les écoles sont aujourd'hui d'accord sur ce principe fondamental; mais voici le point à discuter : le mouvement est-il une translation de parcelles excessivement ténues qui, lancées par le corps éclairant, traversent l'espace avec une très-grande vitesse, arrivent à l'œil et produisent la sensation lumineuse ; ou bien, consiste-t-il en la vibration d'un milieu répandu partout, nommé éther, dont les ondulations sont capables d'impressionner la rétine? La première opinion a été défendue par Newton, la seconde par Huyghens; cette dernière est généralement adoptée aujourd'hui.

Grimaldi, le premier, a dit clairement que la lumière était probablement un fluide en mouvement dans les milieux diaphanes, se propageant sous formes d'ondes au moins dans ces mêmes milieux. A l'appui de cette doctrine il fournit un grand nombre de preuves, entre autres ses expériences sur les franges par diffraction, et la découverte

lui furent présentés pour la première fois, et, après les avoir touchés, fut lui-même très-étonné de ne pas les avoir reconnus.

fameuse de ce fait, que, la lumière ajoutée à la lumière produit l'obscurité[1]; phénomènes dont une explication satisfaisante ne péut être donnée en dehors de la théorie des ondulations. Il rapproche les phénomènes dont nous parlons de ceux que chacun de nous a pu observer lorsque les ondes, développées à la surface d'une eau tranquille, viennent à se rencontrer; on voit alors si, dans les parties qui se superposent, les mouvements sont de signes différents, l'eau rester immobile.

Les expériences de Grimaldi sont d'une importance capitale; de plus, elles peuvent être repétées avec une très-grande facilité; aussi les rappellerons-nous succinctement. 1° On fait pénétrer dans une chambre obscure un rayon de lumière très-délié par un orifice excessivement étroit, percé avec une épingle dans une petite plaque métallique; on obtient alors un cône lumineux un peu plus divergent qu'il le serait si les rayons conservaient rigoureusement leur direction géométrique, et cette augmentation de divergence devient plus sensible lorsqu'on place une seconde plaque percée d'un orifice étroit à une certaine distance de la première sur le trajet de la lumière; alors les arêtes du second cône obtenu ne sont point parallèles à celles du premier, mais elles sont encore plus éloignées de l'axe; d'où l'on conclut que les rayons lumineux, en rasant les bords des orifices à petits diamètres

[1] L'ouvrage de Grimaldi est connu seulement par les deux premières propositions, relatives aux célèbres expériences dont nous parlons ici. Mais on y trouve une infinité de théories physiques des plus justes, qui, de son temps, étaient complétement rejetées par les diverses écoles. On voit la porosité citée comme propriété générale de la matière, l'action du magnétisme considérée comme preuve de l'existence d'un milieu universel, la réfraction prismatique et la marche des rayons décomposés par les gouttes d'eau étudiées avec une exactitude surprenante. Le livre fut publié un grand nombre d'années avant Newton, de telle sorte que ce dernier put en tirer profit pour ses belles découvertes. (Grimaldi, *Physico-mathesis de lumine coloribus et iride.* Opus posthumum. Bologne, 1665, prop. 1, 2, 43.)

se dévient de la ligne droite. 2° Si l'on place un fil très-mince dans le cône lumineux sortant d'une étroite ouverture, et que l'on reçoive l'ombre de ce fil sur un papier blanc placé à une distance convenable, les côtés de l'ombre se trouvent bordés par trois franges colorées dont la largeur décroît à mesure qu'elles s'éloignent des bords, et de plus dans l'intérieur de l'ombre, on voit une ou plusieurs raies lumineuses. On obtient les mêmes résultats (fig. 11) en

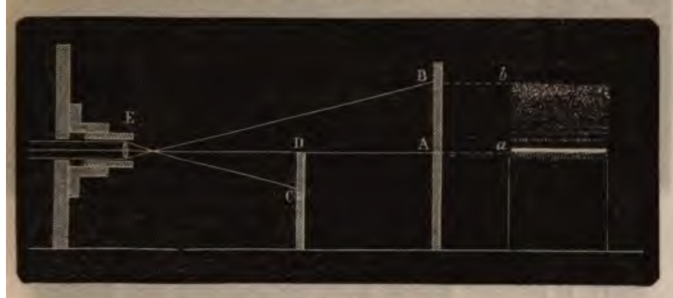


Fig. 11.

interceptant la moitié du cône lumineux à l'aide d'un écran opaque à bord mince, DC, tandis que l'autre va se projeter sur un écran, AB, qui, sur la figure, est représenté de face en *a b*. 3° L'expérience devient très-élégante en plaçant dans le cône lumineux une aiguille à coudre, on voit l'image du chas être obscure au centre et lumineuse sur ses contours, la pointe de son côté paraît grossie. Tous les corps opaques placés dans ce cône lumineux projettent une ombre garnie de franges à l'extérieur et éclairée à l'intérieur avec une intensité rapidement décroissante. Donc il se produit une véritable inflexion de la lumière, ou, adoptant l'expression consacrée, une *diffraction;* en d'autres termes, toutes les fois que les rayons rasent les bords d'un corps solide, ils sont déviés vers l'intérieur de l'ombre du corps. Sur le trajet du cône lumineux des expériences précédentes,

mettons une plaque percée d'un orifice très-fin, et examinons le contour du faisceau transmis, en le recevant sur un papier blanc convenablement éloigné; nous verrons un cercle blanc entouré d'un anneau obscur, puis un autre anneau blanc suivi d'un troisième obscur, au delà duquel se distingue encore un quatrième cercle très-faiblement éclairé; en



Fig. 12.

outre, le premier anneau blanc est beaucoup plus brillant que le cercle central; si alors dans la plaque de métal interposée, nous perçons un second orifice à côté du premier à une distance de 1 à 2 millimètres, les images des faisceaux transmis étant reçues sur un écran à une distance telle que les deux cercles extérieurs brillants se superposent partiellement, le segment lenticulaire commun aux deux cercles est plus sombre, présente un éclat de beaucoup inférieur à celui des parties où les deux cercles sont séparés; ainsi la lumière du premier segment, ajoutée à celle du second, a produit de l'obscurité[1].

[1] La distance de l'ouverture du volet à la première lame peut être d'environ 2 mètres, et cette longueur mesurera encore à peu près l'écartement de la plaque et de l'écran, pour des orifices ayant moins de 1 millimètre de diamètre et placés à 2 millimètres l'un de l'autre. Il est, du reste, facile de trouver par tâtonnement les distances convenables. L'expérience que nous citons est généralement assez mal décrite dans les traités de physique Ajoutons que maintenant pour

Les observations de Grimaldi sur les franges furent accueillies avec faveur par Newton, et il est étonnant que Huyghens n'ait point tiré profit d'expériences aussi favorables à sa théorie des ondulations. Newton, au lieu de rapporter ces déviations lumineuses à un mouvement vibratoire (cependant il admet la possibilité de la chose dans les premières *questions* de son Optique), en donna une explication fondée sur l'existence de prétendues forces attractives émanées des bords des objets et agissant à distance.

La théorie newtonnienne se présentait avec tous les dehors de la simplicité, de plus elle était patronnée par un grand nom ; aussi eut-elle tout d'abord de nombreux partisans; mais, examinée à fond, elle ne se montra pas aussi simple qu'on pouvait le croire à première vue. Les personnes désireuses aujourd'hui de renouveler cette doctrine, ne nous paraissent pas avoir fait cette observation.

Nous croyons donc utile d'examiner ce système avec un peu de soin. Nous établirons le parallèle entre les deux théories, et nous montrerons que toutes les forces imaginées par Newton, afin d'expliquer les phénomènes, se réduisent, en réalité à de simples modifications du mouvement ondulatoire; en outre, nous tirerons de cette comparaison des notions qui nous seront d'un grand secours, lorsque nous traiterons des cas analogues en divers autres points de notre sujet. Notre conduite n'est pas dictée par le désir de faire une critique aujourd'hui inutile des idées anciennes, mais nous voulons montrer qu'en optique, de même que cela arriva fréquemment dans l'étude de la philosophie naturelle, on imagina d'abord des *forces* spéciales pour expliquer les phénomènes, puis les faits furent mieux connus dans leur es-

produire les phénomènes de diffraction, on fait arriver la lumière non plus par un orifice circulaire d'un très-petit diamètre, mais par une fente étroite munie d'une lentille à court foyer. (Voyez figure 11.)

sence, et finalement on reconnut qu'ils se déduisaient très-simplement des lois mécaniques du mouvement.

1° Pour rendre compte de la propagation de la lumière on supposa l'espace rempli par une infinité de corpuscules lancés avec une vitesse de 300,000 kilomètres, et, chose plus étonnante, on accepta que les particules lumineuses étaient projetées avec la même vitesse par les corps portés au plus haut degré de l'incandescence, les astres, par exemple, et par ceux doués comme les vers luisants, du plus faible pouvoir éclairant. Une telle hypothèse nous paraît inadmissible, car la violence de l'impulsion doit être proportionnelle à l'intensité du mouvement dont les corps sont animés, et on ne peut la supposer égale dans tous. Cette difficulté disparaît dans la théorie des ondulations. En effet, la propagation de la lumière étant semblable à celle du son dans l'air, la vitesse dépend uniquement de l'élasticité du milieu, et n'a aucun rapport avec l'intensité de la vibration, celle-ci étant déterminée par l'amplitude plus ou moins grande des oscillations de la molécule vibrante et par suite des particules du milieu ambiant. Donc, dans la seconde hypothèse, la lumière, qu'elle provienne d'une source intense ou faible, doit se propager avec une égale vitesse, de même que cela se présente pour les sons forts ou faibles, aigus ou graves.

2° Voulant expliquer la réflexion, Newton admit des forces répulsives particulières qui, émanant des molécules placées à la surface des corps, repoussaient les particules lumineuses avant qu'elles fussent arrivées réellement au contact des corps. De cette façon, la réflexion était possible malgré les aspérités de la surface; et cependant, entre les particules lumineuses et ces aspérités, il existe une plus grande disproportion que celle dont on pourrait se faire idée en supposant les plus hautes montagnes frappées par des billes de billard.

Le subtil philosophe comprit combien dans son système

était impossible une explication de la réflexion fondée entièrement sur les principes de la mécanique, et il tourna la difficulté en admettant certaines forces répulsives dont il lui était impossible d'assigner la nature. Ces forces sont bien différentes de celles désignées sous le même nom dans le chapitre précédent, lesquelles résultant de l'agitation extrême des molécules de la surface, loin de favoriser la réflexion, ne peuvent que contribuer à la rendre plus irrégulière.

Dans le système des ondulations, il n'est pas nécessaire de faire intervenir de semblables forces; car la lumière devant se réfléchir de même que le son, il suffit de savoir si les ondes lumineuses sont d'une longueur suffisante pour pouvoir se réfléchir régulièrement à la surface des miroirs malgré les aspérités de ces derniers. Or, la longueur de l'onde jaune a été trouvée 5 à 6 fois plus grande que l'épaisseur d'une feuille d'or battu : elle est donc plus longue que les rugosités de la superficie des corps polis; ajoutons que Faraday, par des procédés chimiques, a obtenu des feuilles d'or ayant une épaisseur égale à $\frac{1}{50}$ de la longueur de l'onde jaune[1].

3° La théorie de l'émission rencontra un écueil sérieux lorsqu'il lui fallut donner l'explication de la réfraction. A cet effet, Newton imagina que la lumière dans l'intérieur du corps était attirée avec une force prodigieuse dont l'intensité devait être mille billions de fois plus forte que celle de la pesanteur[2]; cette attraction déviait le rayon de la ligne droite, le pliait en quelque sorte et en même temps elle devait augmenter la vitesse de propagation dans l'intérieur des substances les plus réfringentes. La confirmation de cette vue théorique dépendait donc de la déter-

[1] Faraday, *Philos. transact.*, 1857, p. I, p. 145.

[2] Newton, *Optique*, édit. de Londres, 1706, p. 321. Le nombre est 1,000,000,000,000,000.

mination de la vitesse de la lumière dans les différents milieux. Les expériences faites longtemps après par Arago et Fresnel ont montré que la vitesse de la lumière est moindre dans les corps très-réfringents et très-denses que dans les autres; ces résultats étant contraires à ceux indiqués par la théorie de Newton, celle-ci devient inadmissible. Au contraire, une moindre vitesse de propagation dans les milieux les plus denses, telle est la base sur laquelle est fondée l'explication de la réfraction dans le système de Huyghens; et le fait ayant été trouvé exact par l'expérience, la théorie des ondes trouve ici une preuve solide en sa faveur.

4° Newton rendit compte des phénomènes de diffraction observés par Grimaldi en invoquant des forces répulsives spéciales; et même, dans ce cas, il accorda à ces forces la faculté d'exercer leur action à une certaine distance des corps, et avec une espèce d'alternative rhythmée [1]. Cette hypothèse était nécessaire pour expliquer comment les franges pouvaient exister au nombre de trois et se développer en dehors des corps, avec la loi d'alternance que nous avons signalée. Il admit de semblables oscillations sous le nom d'*accès* de facile réflexion et de facile transmission, pour établir la théorie des couleurs présentées par les lames minces, et il était assez disposé à attribuer ces accès aux vibrations calorifiques des corps [2].

On ne peut se lasser d'admirer la fécondité d'imagination déployée par Newton dans la création des hypothèses destinées à expliquer cette masse énorme de faits, qui, grâce aux travaux des géomètres modernes, se déduisent avec une merveilleuse facilité du système des ondulations. Assurément, on peut dire à ce sujet : *Si Pergama dextra*

[1] Les rayons qui passent le long d'un corps ne s'infléchissent-ils pas plusieurs fois en divers sens par un mouvement semblable à celui d'une anguille? (Newton, *Optique*, question III.) (*Note du traducteur.*

[2] *Ibid.*, question XXI.

defendi possent... hac defensa fuissent, et ceux qui de nos jours songent à ressusciter la théorie de l'émission devraient au moins, à l'exemple du grand philosophe anglais, se préoccuper de satisfaire à toutes les exigences des phénomènes de l'optique moderne.

5° Mais la sagacité du savant physicien fait un dernier effort lorsqu'il tâche d'expliquer comment un rayon lumineux tantôt se dédouble, tantôt reste simple en traversant un cristal de spath d'Islande, posé en travers sur un autre de même substance. A cette fin, il suppose : 1° les rayons limités par de véritables faces; 2° les molécules lumineuses douées de pôles semblables à ceux des aiguilles aimantées, et qui tantôt favorisent leur passage à travers les pores des substances, d'autres fois, au contraire, s'y opposent. Chose singulière, cette hypothèse renfermait en germe une notion admise encore maintenant dans la théorie des ondulations. Toujours est-il qu'elle ne pouvait expliquer clairement la double réfraction, si ce n'est en supposant, sans la prouver, dans les rayons, une propriété essentielle d'une nature parfaitement inconnue. Au contraire, Huyghens, en considérant l'onde comme se dédoublant dans l'intérieur du cristal en une onde sphérique et une autre ellipsoïdale, donnait de tous les phénomènes une raison parfaitement géométrique. Il ignorait cependant la véritable cause de ce dédoublement, et Newton se fondait sur l'incertitude du principe fondamental pour repousser les explications du savant hollandais; mais la solution de cette difficulté dépassait les connaissances mécaniques de l'époque, et nous verrons plus tard comment elle a été trouvée. Il est singulier qu'un géomètre aussi profond que Newton n'ait pas été convaincu par l'analyse élégante de Huyghens, et qu'il ait pu se borner à admettre les rayons doués naturellement de la double réfrangibilité[1].

[1] *Optique*, question XVII, p. 299. Les belles découvertes d'Huyghens en optique contrastent avec les opinions beaucoup moins exactes qu'il

Newton adressait deux objections principales au système des ondes : 1° il disait que les ondes devaient se répandre dans tous les sens, contourner les corps opaques, et dès lors il ne devrait pas y avoir d'ombre sur les contours des corps de cette espèce; 2° il rejetait l'existence d'un milieu occupant tout l'univers, car ce milieu opposerait une résistance au mouvement des planètes. Mais cette seconde objection pouvait être retournée contre lui, car on pouvait lui répondre que, d'après son hypothèse, les espaces célestes ne devaient pas être vides, étant traversés incessamment par une quantité innombrable de molécules émanées de toutes les sources lumineuses qui rayonnent les unes vers les autres.

Quant à l'autre objection, on voit que Newton ne tenait aucun compte du principe fondamental sur lequel se fondait Huyghens pour résoudre le problème et prouver que la lumière ne doit point contourner les obstacles, principe dont nous parlerons bientôt; cependant Huyghens lui-même assurait qu'il s'était décidé à admettre le système des ondes seulement après avoir établi ce théorème. Du reste, toute difficulté disparaît en examinant les analogies qui nous sont offertes par l'acoustique; on a reconnu en effet la formation de véritables ondes sonores; et d'ailleurs les franges de Grimaldi ne démontraient-elles pas un infléchissement des rayons autour des corps opaques?

L'*Optique* de Newton est assurément un monument impérissable de son immense génie, mais il est permis de comparer cette œuvre à une machine qui ne fonctionne bien qu'entre les mains de son inventeur. L'arc d'Ulysse ne pouvait, dit la fable, être bandé que par le héros; de même, pour la théorie matérielle de la lumière, le grand Newton était le seul mathématicien assez puissant pour adapter sa théorie aux divers phénomènes à l'aide d'hy-

professait au sujet de la gravitation. Tant il est vrai que *non omnia possumus omnes*.

pothèses ingénieuses. Le grand nombre de forces particulières nécessaires pour expliquer chacune des nouvelles découvertes, voilà le côté faible du système; aussi les inconvénients grandissant à mesure que les observations se multipliaient et que les phénomènes devenaient plus compliqués, les plus chauds partisans se déclarèrent vaincus lorsqu'il leur fallut aborder la théorie de la polarisation et de la double réfraction, et ils furent contraints d'adopter l'hypothèse des ondulations, qui, seule, permet de ramener tous les faits connus à des lois simples bien supérieures aux notions incomplètes fournies par la doctrine de l'émission[1].

Laissons donc de côté la théorie newtonienne et cherchons à faire comprendre le système des ondulations, en nous occupant spécialement des points utiles à notre sujet et renvoyant aux traités spéciaux pour la démonstration d'un grand nombre de théorêmes.

CHAPITRE III

SYSTÈME DES ONDULATIONS. — NOTIONS SUR L'ÉTHER.

Descartes, voulant expliquer le mouvement des astres, avait supposé les espaces célestes remplis d'une matière très-subtile; son hypothèse n'exerça aucune influence réelle sur les progrès de la mécanique céleste, mais elle aida puissamment à la découverte de la véritable nature de la lumière.

L'idée de ce milieu universel, mal comprise par son auteur, se perfectionna dans l'école cartésienne, et déjà, Malebranche pensait que les couleurs, au lieu d'être une

[1] Pour citer une seule preuve : dans le traité d'Herschel sur la lumière, ce savant, arrivé à la polarisation et à la double réfraction, se décide positivement en faveur de la théorie des ondes.

propriété absolue des rayons lumineux comme le voulait Newton, dépendaient de la différence des longueurs d'ondes propres au milieu dans lequel elles se propageaient[1]. Cette hypothèse trouva dans Huyghens un géomètre qui sut élever les vagues conceptions des métaphysiciens à la hauteur de vérités mathématiques[2].

Suivant la théorie ondulatoire, nous l'avons déjà dit, la propagation de la lumière se fait par une suite de pulsations ou oscillations d'un fluide impondérable nommé éther; le mode de transmission est donc en tout point comparable à celui des ondes sonores dans l'air atmosphérique. La longueur de l'onde lumineuse détermine la *couleur*, de même que celle de l'onde aérienne fait la *hauteur* du son, et de l'amplitude des oscillations des atomes éthérés dépend l'*intensité*, comme de l'amplitude des oscillations accomplies par les molécules d'air résulte la force d'un son. On nomme rayon lumineux toute droite menée du point lumineux perpendiculairement à la surface de l'onde. La réflexion s'explique de la même manière que celle du son, et la réfraction dépend de la moindre vitesse de la lumière traversant un milieu plus réfringent Les démonstrations géométriques de ces divers phénomènes données par Huyghens sont encore les plus élégantes et les plus simples de celles connues jusqu'à aujourd'hui.

Parmi les objections que Newton adressait à la théorie des ondes, en voici une qui, à son avis, était capitale : Comment, disait-il, la lumière solaire, en pénétrant dans une chambre obscure par un orifice circulaire, peut-elle former un faisceau cylindrique? Elle devrait se répandre dans tous les sens. Huyghens réfuta cette objection avec une simplicité admirable, en établissant le théorème véritablement fondamental de la théorie qui nous occupe.

[1] Priestley, *History of vision, light and colours*. London, 1772, p. 240.

[2] C. Hugenii *Opera*. Amsterdam, 1720, vol. I, spécialement p. 14.

Voici sa proposition, nommée depuis principe d'Huyghens (fig. 13) : Toutes les fois qu'un point unique P est animé de vibration, il développe autour de lui une onde de forme sphérique MN ; mais en réalité une seule onde est incapable de nous donner la sensation de la lumière qui, toujours, est produite par plusieurs ondes successives et

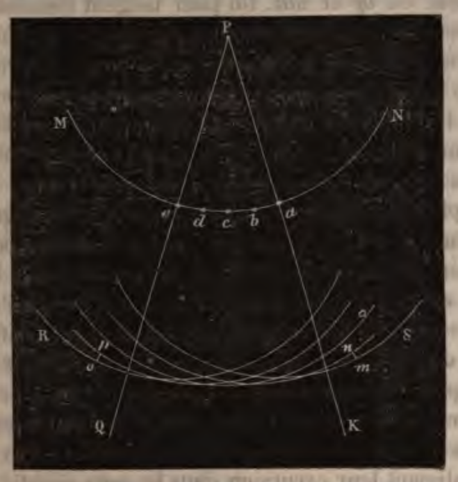


Fig. 13.

par plusieurs points vibrant simultanément ; alors les mouvements s'ajoutent les uns aux autres et déterminent une impression assez forte pour donner naissance à une sensation lumineuse. La direction du rayon est donc celle de la résultante de tous ces mouvements, et voici la manière de la déterminer. On peut regarder tous les points *abcde* de la surface d'onde considérée dans une certaine position MN comme autant de centres d'ébranlement produisant des ondes sphériques secondaires qui s'étendent toutes avec une même rapidité : celles-ci auront une certaine surface enveloppe RS, qui sera l'onde générale re-

présentant l'onde primitive MN parvenue en RS à une certaine distance du point lumineux P. Or les ondes partielles figurent autant de sphères ayant chacune leur centre en des points différents, et dont les surfaces s'écartent rapidement les unes des autres et cessent bientôt de pouvoir être tangentes à une même surface, comme cela se voit facilement en *op* et *mn*. Un plan tangent simultanément à plusieurs ondes élémentaires ne peut exister dès lors dans un point infiniment voisin de la ligne droite qui joint le point lumineux P au nouveau point pris pour centre. Les éléments déterminés avec cette condition seront donc parallèles à la surface sur laquelle sont placés tous les centres d'ébranlements *abcde*, et cette surface étant sphérique, la surface, enveloppe RS, sera également sphérique. Il suit de là que la portion d'onde comprise entre les droites P*e*Q et P*a*K conserveront toute leur intensité en superposant leurs effets d'une manière concordante, tandis que, pour les parties de l'onde situées en dehors de ces lignes, elles seront : 1° trop dilatées et trop isolées pour impressionner la rétine, et 2° elles se détruiront réciproquement, car les parties en mouvement, dans un sens positif par exemple, se superposeront aux parties accomplissant leur excursion dans le sens négatif; conséquemment les ondes s'éteindront mutuellement. En effet, chacune des ondes ayant une phase positive et une négative, il arrivera qu'en un point quelconque *m*, situé hors du cône QPK, on aura le mouvement positif de la première onde partie de *a*, puis le mouvement négatif parti de *b*, par conséquent les deux vitesses se détruiront. Mais on voit que cette destruction mutuelle des ondes lumineuses ne sera pas complète partout, et que, dans le voisinage des ombres géométriques Q et K, on observera des alternatives de renforcement et de neutralisation qui nous expliquent l'origine des franges. Ces franges seront d'autant moins sensibles que le nombre des centres lumineux

primitifs tels que P sera plus grand, car les ondes émanées d'un système de points détruira l'effet de celles émises par un autre système.

Le principe d'Huyghens a été confirmé d'une manière remarquable par les découvertes modernes sur les réseaux. Dans les expériences que nous rappelons, on voit les parties des ondes, éloignées de la ligne droite suivie par le rayon qui traverse une ouverture très-étroite se renforçant mutuellement d'espace en espace, produire des franges colorées à une grande distance de l'axe du rayon, tandis que, en d'autres points, elles s'entre-détruisent et forment des bandes obscures. On explique de même la dilatation conique éprouvée par un pinceau de lumière lors de son passage à travers un orifice étroit, dilatation dont le degré augmente à mesure que diminue le diamètre du trou, et par suite la portion de la surface de l'onde interceptée qui a donné naissance aux ondes transmises; si le pinceau lumineux avait été plus large, la destruction du mouvement latéral aurait été plus complète. Donc, puisque l'orifice le plus petit peut renfermer encore une infinité de nouveaux centres d'ébranlement, il est nécessaire de réduire autant que possible ses dimensions pour obtenir un effet de dilatation appréciable.

La destruction réciproque des mouvements ondulatoires, indiquée par Grimaldi, mise à profit par Huyghens, fut généralisée par Young, qui en fit sortir le principe des *interférences*, c'est-à-dire de la destruction mutuelle de deux rayons. Ce principe s'applique à deux rayons de même origine, autrement dit à deux systèmes d'ondes développées par une même surface lumineuse, et il nous apprend que si l'un des deux systèmes retardant sur l'autre d'une demi-longueur d'ondulation, ils viennent à se superposer, les phases positives du premier coïncideront avec les phases négatives du second; alors les mouvements se neutraliseront : il y aura obscurité. Si, au contraire, le re-

tard est de deux demi-longueurs d'ondes, c'est-à-dire d'une onde entière, il y aura renforcement des ondes de l'un des systèmes par celles de l'autre, les phases de même ordre étant concordantes. Inutile d'ajouter que, par des raisons semblables, il y aura destruction de mouvement pour tout nombre impair de demi-longueurs et au contraire renforcement pour tout nombre pair.

En faisant interférer les rayons à l'aide de procédés variés, puis mesurant les distances parcourues par chacun d'eux, on a pu vérifier l'exactitude du principe énoncé et expliquer une infinité de phénomènes, tels que les franges de Grimaldi, la destruction de la lumière dans le cas de deux rayons traversant deux fentes très-minces et fort rapprochées, ou réfléchis par deux miroirs inclinés, les phénomènes des anneaux offerts par les lames minces. Fresnel, l'auteur de toutes ces recherches, eut soin de supprimer toute influence que pourraient exercer les bords des objets, et ainsi il n'avait nul compte à tenir de la force répulsive qui, suivant Newton, émanait de ces bords. Dans une série d'expériences faites avec la collaboration d'Arago, il obtint le déplacement des franges en fixant une petite plaque de verre devant l'une des ouvertures étroites qui admettaient les rayons, et il en conclut que, conformément à la théorie d'Huyghens, la lumière se propageait dans le verre plus lentement que dans l'air, le verre étant plus réfringent que l'air. Cette vérité a été de nos jours mise en plus grande évidence par les expériences de Fizeau et Foucault.

Les phénomènes d'interférence permirent de mesurer la longueur des ondes. On trouva que pour une certaine couleur la longueur était exactement quatre fois plus grande que la valeur admise par Newton pour la distance des accès dans les lames minces. Ce rapport établit une relation vraiment admirable entre des phénomènes très-divers en apparence et dont la doctrine newtonienne fournissait une

explication vague et sans aucune liaison avec les autres parties de la théorie générale. Aussi sa connaissance fut-elle d'un grand secours lorsque plus tard on découvrit la polarisation chromatique.

La détermination de la longueur des ondes offre un intérêt tout spécial au point de vue de la distinction des rayons. Les ondes colorées diminuent d'étendue depuis le rouge jusqu'au violet, par conséquent les vibrations produisant la chaleur obscure surpassent de beaucoup en longueur celles qui excitent les actions chimiques. La longueur d'onde de l'extrême rouge situé à côté de la raie A de Fraünhofer est, d'après Mossotti [1], 738 millioniémes de millimètres. Pour le milieu du jaune, c'est-à-dire au maximum du pouvoir éclairant, on trouve 553,5, et enfin l'extrême violet près de la raie I correspond à 369. Les nombres précédents fournissent très-sensiblement les limites extrêmes du spectre visible, au moins pour les vues ordinaires. Ils nous montrent que l'onde de l'extrême rouge est double de l'onde de l'extrême violet, la plus grande intensité lumineuse correspond à la moyenne entre ces deux quantités. Ainsi les limites de sensibilité de l'œil sont séparées par un intervalle égal à celui qui, en acoustique, est nommé une octave.

Les espaces obscurs du spectre, observés par Fraünhofer et nommés par lui *raies*, prouvent que la variation de la longueur des ondes parvenant jusqu'à nous ne suit pas une loi de continuité. Or, avec les puissants spectromètres modernes, on est parvenu à observer une infinité de raies ; donc d'une longueur d'onde à une autre il existe un intervalle mesurable, quoique très-petit. Ces lacunes ne sont pas véritablement causées par un défaut de continuité dans les ondes qui peuvent prendre naissance dans l'éther, mais elles tiennent à d'autres circonstances dont l'étude sera

[1] Mossotti, *des Propriétés des spectres de Fraünhofer*. Pise, 1845, p. 23.

faite plus tard. En effet, elles disparaissent dans le cas des solides simplement incandescents : alors on obtient des spectres tout à fait continus. A ce sujet, on nous permettra une remarque. Quelques auteurs ont voulu trouver les lois des harmonies des couleurs en les déduisant des rapports trouvés entre la longueur des ondes correspondant à ces raies obscures ; mais ces conclusions ne reposent pas sur des faits parfaitement établis, et, au lieu de se baser sur ces raies pour établir les combinaisons de couleurs agréables ou désagréables à l'œil, il serait préférable de se fonder sur les longueurs d'ondes propres aux teintes dont l'harmonie est reconnue dans les arts.

Si maintenant nous cherchons les limites extrêmes des radiations calorifiques et chimiques, nous les trouvons de beaucoup plus éloignées. Selon Müller, la plus longue des vibrations calorifiques obscures mesurées jusqu'à ces derniers temps est de $0^{mm},00183$, elle est donc triple de celle de la raie D, dont la valeur $= 0^{mm},0006$, et sextuple de l'onde extrême fluorescente, c'est-à-dire de l'ultraviolet fixée à $0^{mm},0003$ par Esselbach. Ainsi les ondes calorifiques sont environ six fois plus longues que les vibrations extrêmes chimiques nommées ondes fluorescentes. Du reste, l'étendue totale du spectre complet n'est pas toujours la même : Stokes, par des méthodes fort délicates, a obtenu, à l'aide de la lumière électrique, un spectre chimique dans lequel la partie fluorescente était 6 fois plus longue que la région lumineuse [1].

La figure 10 de la page 165 montre la loi d'accroissement de la longueur des ondes en allant du violet au dernier rayon calorifique obscur. La courbe FO par ses ordonnées donne les longueurs approchées relatives aux diverses parties du spectre.

Il convient ici d'établir un parallèle entre l'échelle

[1] Müller, B. U. *Arch. sc. physiques*, 1859, vol. IV, p. 364, et *Silliman Journal*, 1863, p. 108.

spectrale et l'échelle sonore. D'après les physiciens, les sons les plus graves perceptibles correspondent à 31 vibrations par seconde, et les plus aigus à 36,000 vibrations; le rapport entre les extrêmes de la série acoustique est donc de 1 à 1126. Pour les vibrations de l'éther, le rapport est beaucoup moindre, et, selon toutes probabilités, il existe une lacune énorme entre les vibrations des corps sonores et les agitations moléculaires calorifiques. Mais de ce que nous ne percevons pas certaines ondes, il n'en faut pas conclure qu'elles n'existent point. Ainsi au delà de la limite obscure désignée sur notre figure par la lettre P, il peut y avoir d'autres ondes plus longues, que nous ne pouvons apprécier par nos procédés expérimentaux et qui pourraient réunir les deux séries. La chose paraît même fort probable. En effet, en prenant l'extrême rayon calorifique de Müller, cette onde serait déjà seulement 1770 fois moindre que les ondes les plus courtes mesurées par Kœnig dans les corps sonores. La grande difficulté que l'on éprouve à distinguer les sons extrêmement aigus résulte de ce que les vibrations ayant une durée extrêmement petite, et ne se prolongeant pas comme les sons musicaux ordinaires, elles se confondent avec le choc qui a mis le corps sonore en mouvement. Ainsi l'onde calorifique la plus longue et l'onde aérienne la plus courte, sont séparées par une distance un peu inférieure au double de l'intervalle compris entre les sons extrêmes perceptibles; nous avons vu que ce dernier intervalle était celui de 1 à 1126, et Kœnig, par des moyens spéciaux, ayant obtenu des sons de 50,000 vibrations, ce rapport peut être élevé à 1 : 1560. Or ce rapport est sensiblement celui des longueurs de l'onde la plus lente et de l'onde sonore la plus rapide.

Les corps vibrants qui rendent ces sons excessivement aigus s'échauffent et finissent par atteindre l'incandescence; par conséquent leurs molécules sont susceptibles de vibrer dans toute l'étendue comprise entre les limites

acoustiques et optiques. Nous sommes donc en droit de conclure que le mouvement oscillatoire des particules matérielles peut s'effectuer avec une lenteur extrême ; comme cela arrive pour les sons musicaux les plus graves, puis s'accélérer jusqu'à présenter cette incroyable vitesse de 946,000,000,000,000 vibrations par seconde qui caractérise l'onde chimique extrême du spectre.

Avant d'abandonner ce sujet, nous ferons remarquer que les ondes lumineuses nous offrent un étalon de mesure absolu et inaltérable. La longueur de l'onde du sodium est toujours identique à elle-même, tant que le métal conserve sa *nature*. Cette longueur est donc un type de mesure linéaire aussi invariable que la nature des choses. Et un étalon ainsi choisi ne devrait pas être repoussé comme étant trop petit; car le rapport entre la longueur de l'onde sodique et la longueur du mètre n'est pas beaucoup différent de celui qui existe entre le mètre et son prototype, c'est-à-dire le quart du méridien terrestre. En effet, le mètre ayant été pris égal à la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre, l'onde du sodium est la six-millionième partie du mètre : l'onde de l'hydrogène dans le rouge est encore plus grande [1]. Ajoutons que ces mesures d'onde ont été obtenues à l'aide des franges produites par les réticules, lesquelles ont une notable largeur, de sorte que outre la facilité des mesures, on a encore la certitude de pouvoir obtenir toujours des résultats identiques. Mais terminons ici cette petite digression et revenons à notre sujet.

La durée d'une vibration jaune moyenne étant 530 quatrillionièmes de seconde [2], on saisit facilement comment

[1] Selon van der Willingen, l'onde de la raie C = 6565,6 dix-millioniémes de millimètres.

[2] Il faut donc 350,000,000,000,000 pulsations lumineuses pour donner naissance à la couleur qui dans le spectre occupe le milieu du jaune.

une onde seule, et même un petit nombre d'ondes, ne peut ébranler le nerf optique. La sensibilité de la rétine, pour être excitée, demande une impression suffisamment énergique et durant au moins quelques centièmes de seconde : faible intervalle de temps pendant lequel plusieurs billions d'ondes lumineuses peuvent se produire. Voilà encore une nouvelle preuve en faveur de ce que nous avons dit plus haut pour expliquer : 1° comment l'œil n'est pas sensible à l'action des ondes latérales qui prennent naissance au delà d'un orifice étroit traversé par un faisceau lumineux ; 2° comment il se fait que les ondes lumineuses ne paraissent pas se répandre dans tous les sens.

La vitesse de propagation de la lumière dans un milieu varie avec le degré d'élasticité de ce milieu ; par conséquent, la lumière se propageant à raison de 300,000 kilomètres par seconde, il en résulte que l'élasticité de l'éther doit être très-considérable. Cette élasticité tient-elle à la constitution de l'éther, qui, selon Huyghens, serait un fluide formé de sphères élastiques, ou bien est-elle un simple effet de la rotation des molécules d'éther? Cette question sera élucidée plus loin. Toujours est-il que l'éther doit être énormément élastique. Le calcul enseigne que, dans un milieu homogène, un ébranlement vibratoire se propage avec une vitesse représentée par la racine carrée du quotient de l'élasticité par la densité $V = \sqrt{\frac{e}{d}}$. Donc, si nous pouvons connaître un des deux termes de ce rapport, nous aurons l'autre ; mais jusqu'à présent il a été impossible de déterminer isolément l'une des quantités e et d. On dit à la vérité que l'éther doit être d'une très-faible densité, car dans les espaces intraplanétaires il n'oppose aucune résistance au mouvement des corps célestes ; cette proposition est une pétition de principe : on suppose en effet l'éther destiné exclusivement à propager la lumière ; or rien ne prouve

qu'il ne puisse être lui-même principe de la gravité, et si cela était, évidemment il pourrait présenter une très-grande densité sans apporter aucune perturbation dans le système planétaire. D'un autre côté, en admettant avec quelques-uns la très-faible densité de l'éther, il est difficile de comprendre comment un milieu extrêmement rare (c'est-à-dire dans lequel des atomes très-petits sont séparés par des distances très-grandes) peut propager un mouvement avec une énorme vitesse, et, de plus, sous forme d'ondes tellement courtes, que 2,000 au moins sont nécessaires pour représenter une longueur de 1 millimètre.

Cauchy, en soumettant à une analyse très-rigoureuse certaines observations d'Arago, arriva à conclure que la distance entre deux molécules d'éther devait être sensiblement de $\frac{1}{200}$ de l'onde rouge[1].

D'autres physiciens ont émis une hypothèse tout opposée. Pour eux, l'éther est un milieu continu, supposition inadmissible aujourd'hui, car les phénomènes de la polarisation de la lumière montrent que l'éther est constitué par des atomes séparés. Jusqu'à présent, il nous est donc impossible de chercher un rapport entre la densité de l'éther et celle de la matière pondérable, parce que les termes de comparaison nous manquent complétement.

Assurément l'éther est une *matière* susceptible d'être mise en mouvement par la vibration des particules appartenant aux corps en ignition, de même que nous voyons dans l'air la vibration d'un instrument de musique développer des ondes sonores; si bien que l'on peut établir de précieux rapprochements entre ces deux ordres de phénomènes. Ainsi : 1° notre oreille est le seul organe capable de percevoir comme *son* l'ondulation aérienne, tandis qu'un solide animé de vibration, étant mis en contact avec une partie quel-

[1] Cauchy, *Exercices d'analyse et de phys. math.*, t. I, p. 326.

conque de notre corps, nous fait percevoir une série de chocs; de même l'œil a seul la faculté de sentir le mouvement de l'éther comme *lumière*, et tous nos membres peuvent percevoir la vibration de la matière sous forme de chaleur; 2° le son et le frémissement vibratoire d'un corps reconnaissent tous deux pour origine des mouvements de même nature, mais l'un se passe dans l'air et l'autre dans un corps solide; de même la lumière et le calorique dit statique ou de température sont des mouvements similaires : le premier se produit dans l'éther, et le second dans un corps pesant; 3° parfois les vibrations de l'air ne produisent aucune impression sur l'oreille, certains sons nous échappent, parce qu'ils sont trop graves, les autres à cause de leur trop grande acuïté; l'œil se trouve dans les mêmes conditions relativement aux vibrations extrêmes des spectres calorifique et chimique; 4° un corps sonore, par l'intermédiaire de l'air, communique son mouvement aux instruments accordés à l'unisson, quand même ils seraient à une assez grande distance; de son côté, un corps chaud échauffe un autre placé à distance, car, grâce à l'éther, un échange s'établit entre eux par simple rayonnement. Ces principes une fois posés, il devient inutile de chercher la lumière sans chaleur, et Melloni, à la fin de sa trop courte carrière scientifique, était arrivé à cette même conclusion; 5° l'amplitude des vibrations dans les corps sonores est extrêmement petite, eu égard à la longueur des ondes aériennes; la même chose doit arriver mais à un degré encore plus élevé pour les vibrations lumineuses. Grove, en faisant réfléchir un rayon solaire sur une petite lame de platine formant miroir, n'a pu constater aucune différence dans le rayon réfléchi successivement par le métal d'abord froid, puis porté à l'incandescence à l'aide d'un courant électrique.

Tout aussi bien que les rayons calorifiques, les rayons

chimiques présentent des phénomènes d'interférence; par suite, on doit les regarder comme un genre de mouvement particulier, et les actions chimiques de la lumière se classent parmi les actions mécaniques au même titre que les effets calorifiques. La question : « Que devient la lumière lorsqu'elle s'éteint? » se transforme en cette autre : « Que devient le mouvement lorsqu'il cesse d'être appréciable à nos sens? » Ainsi, la théorie dynamique ramène à de simples problèmes de transformation de mouvement la théorie de tous les phénomènes qui présentaient des difficultés considérables dans le système de l'émission; car, pour en donner une explication rationnelle, on était forcé de supposer un anéantissement de la matière lumineuse.

Les indications précédentes sont suffisantes pour le moment; nous les développerons plus tard, et nous montrerons alors comment l'optique fournit les preuves les plus complètes à l'appui de la théorie dynamique de la chaleur.

Il sera bon maintenant de donner quelques notions générales sur l'éther, car encore à notre époque, un grand nombre de personnes acceptent l'hypothèse de l'éther avec la plus grande répugnance.

Plusieurs physiciens modernes, reconnaissant que l'émission newtonienne est impossible à soutenir plus longtemps, ont supposé que la lumière se propageait simplement par l'intermédiaire de la matière pondérable[1]. Nous discuterons cette opinion en parlant de la transmission de la lumière par les solides diaphanes, car dans ces substances l'éther a des rapports tellement intimes avec la matière pesante, qu'il est difficile de décider si lui seul agit dans ces conditions. Admettons donc jusqu'à nouvel ordre que l'éther peut pénétrer tous les corps, à la façon des molécules lumineuses imaginées par les newtoniens, ou bien encore à la façon des radiations admises par d'au-

[1] Exemple le célèbre M. Grove cité par nous en maintes circonstances.

tres savants; et, négligeant pour le moment le côté général de la question, nous nous bornerons à l'examen de la propagation de la lumière dans les espaces planétaires.

Si l'on suppose ces espaces occupés par une matière pondérable proprement dite, avec toutes les qualités qui lui sont propres, par exemple par une sorte d'extension des atmosphères planétaires, l'hypothèse est inexacte, nous le déclarons sans hésiter. Il n'existe aucune preuve de cette diffusion indéfinie des atmosphères, et l'admettre serait renverser d'un seul coup toute la mécanique céleste. Bien plus, il n'est pas possible de regarder cette matière comme extrêmement raréfiée, car alors comment expliquer son élasticité considérable et la rapidité avec laquelle elle propage la lumière? En effet, d'après la loi de Mariotte (on doit admettre cette loi pour un gaz aussi raréfié), l'élasticité étant proportionnelle à la densité, la vitesse de propagation deviendrait celle que nous présentent les corps pesants, c'est-à-dire infiniment moindre que celle de la lumière. Mais si l'on entend par continuation d'atmosphère une expansion de leur matière constitutive, raréfiée et placée en état de répulsion absolue ou d'atténuation, c'est-à-dire formée par les atomes élémentaires, alors la question change d'aspect, et la discussion roule plutôt sur les mots que sur le fond, comme nous allons le prouver.

Il est vraiment curieux de voir comment d'un côté certains physiciens cherchent à tout rapporter à l'action de l'éther, tandis que d'autres regardent cet agent comme un jeu de l'esprit dont on peut se passer complétement pour expliquer la constitution des corps. A entendre ces derniers, tout se réduit à démontrer que chaleur et électricité sont un simple mouvement de la matière pondérable, et que l'on peut se dispenser d'admettre un milieu impondérable servant à la propagation de la lumière. Nous avons suivi rigoureusement tous leurs raisonnements, et

ils ne nous ont pas convaincus. Aussi regardons-nous comme indispensable d'admettre l'existence de l'éther.

A la vérité, on peut laisser de côté le fluide calorifique : un grand nombre de phénomènes électriques s'expliquent par le seul mouvement de la matière pondérable; mais il y a aussi dans cette classe de phénomènes des faits très-nombreux pour lesquels une explication de ce genre est inadmissible, et si l'on veut en rendre un compte exact, il faut ou supposer des actions s'exerçant à distance sans aucun intermédiaire, chose parfaitement absurde, ou imaginer ces forces dont la nature nous est complétement inconnue, et que dès lors nous cherchons à exclure du domaine de la physique. Tels sont les phénomènes électro-dynamiques et magnétiques, qui journellement et dans des circonstances très-variées se manifestent au sein d'espaces complétement vides de matière pesante. Admettre un certain fluide comme cause des phénomènes physiques, ce n'est pas repousser les explications des faits basées sur les théories mécaniques; a-t-on jamais dit qu'il niait les principes du mouvement, celui qui expliquait l'ascension de l'eau dans les pompes par un jeu de la pression atmosphérique, ou bien encore le transport du son jusqu'à l'oreille par le moyen de l'air? En raisonnant ainsi, on ne peut certes pas être accusé de se livrer aux fantaisies de l'imagination. Or toute une classe de faits sont inexplicables sans l'hypothèse d'un milieu universel, et un grand nombre d'autres phénomènes deviennent, grâce à elle, d'une intelligence très-facile; donc, nous pouvons rationnellement accepter cette hypothèse; en cela nous suivons la méthode des sciences physiques, c'est-à-dire que nous démontrons les principes *a posteriori* et non *a priori*.

La répugnance que l'on éprouve à admettre un milieu étendu entre nous et les astres nous semble être une conséquence involontaire de notre habitude de nier l'existence de tout ce qui n'agit point sur nos sens, et spé-

cialement sur ceux de la vue ou du toucher; mais l'observation même la plus superficielle ne tarde pas à nous montrer le peu de valeur d'un criterium exclusivement fondé sur nos sensations; nous trouvons même ici un exemple à l'appui de ce dire.

Newton lui-même, et certes il était un zélé partisan des forces abstraites, n'hésitait pas à déclarer que la gravité pouvait résulter de l'action de quelque milieu interposé[1]; bien plus, il déclare que, sans ce milieu, on serait conduit à admettre de la part des corps une action à distance, conséquence radicalement absurde. « On ne peut comprendre, écrit-il dans sa troisième lettre à Bentley, comment une matière brute et inanimée pourrait, sans le secours d'un agent non matériel, produire des modifications dans un autre corps, alors qu'elle ne serait point en contact avec ce corps (et cependant les choses se passeraient de la sorte si, admettant les idées d'Épicure, on regardait la gravité comme une propriété inhérente et essentielle)... Supposer que la gravité soit une qualité innée, essentielle, inhérente, à la matière, de telle sorte qu'un corps puisse exercer son action sur un autre plus ou moins éloigné, sans l'interposition d'aucune autre substance établissant une communication quelconque entre eux, me paraît une chose tellement absurde, qu'elle ne peut arrêter un seul instant quiconque a l'expérience de la philosophie. La gravité doit tirer son origine d'un agent dont l'action est continue et soumise à des lois déterminées; mais cet agent est-il matériel ou immatériel? Voilà une question que dans tous mes ouvrages j'ai livrée à la méditation des lecteurs[2]. »

Ces dernières paroles de Newton ont été pour quelques-

[1] « Quam ego, attractionem appello fieri sane potest ut ea efficiatur impulsu vel alio modo nobis ignoto optice. » (Newton, *Optique*, q. XXIII.)

[2] Nous remarquerons cependant que dans la même lettre il dit évidemment que cet agent est matériel (trois lignes plus loin). Cette lettre a été traduite en italien par E^me de Luca in *Giornale Arcadico*.

uns l'origine d'une idée fausse; ils crurent que l'éther était quelque chose d'immatériel, parce qu'il était impondérable. On a fait ici confusion entre deux propriétés très-distinctes, savoir : l'inertie et la gravité; la seconde n'est pas, comme la première, une qualité essentielle de la matière. On peut concevoir une matière non pesante, mais toute matière doit être inerte, c'est-à-dire qu'elle exige une force pour être mise en mouvement. Cette notion est tellement juste que, d'après l'ensemble des phénomènes connus, l'éther pourrait bien être la cause de la gravité. Ce fluide universel présente certainement une constitution différente de celle des gaz ou des autres corps connus de nous : par suite sa nature ne peut nous être révélée par les phénomènes étudiés jusqu'ici; mais les recherches que nous analyserons plus loin fourniront de précieuses indications sur ce point.

On peut admettre sans difficulté que l'éther existe dans l'intérieur de tous les corps; on sait en effet combien sont poreuses les substances même les plus compactes en apparence; du reste, on doit les admettre comme telles pour expliquer le passage de la lumière à travers leur épaisseur, quel que soit le système adopté. Mais il faut bien s'entendre sur le mot *porosité;* suivant que l'on adopte l'un ou l'autre des deux systèmes, cette expression n'a pas la même valeur, car pour les partisans de l'émission, les pores devront être rectilignes et dirigés dans tous les sens, disposition presque impossible à comprendre, tandis que, dans la nouvelle théorie, on peut leur conserver la disposition qu'on leur attribue ordinairement, car rien n'empêche les ondes lumineuses de contourner les molécules[1].

Les physiciens qui, repoussant l'hypothèse de l'éther, admettent une raréfaction de la matière, ont émis cette opinion que la lumière pourrait bien s'expliquer par une émanation périodique et alternative de cette espèce de

[1] Cette remarque est de Leop. Nobili, *Nuovo Tratt. d'ottica*. Milano, 1820.

matière raréfiée, et ils espèrent ainsi concilier les deux systèmes. Mais, à notre avis, une semblable théorie ne peut s'appliquer à tous les cas observés en optique, et particulièrement à la polarisation; de plus, elle est au moins inutile. En effet, si cette émanation est continue et dure depuis l'origine des choses, l'espace doit être actuellement rempli de ces *infiniment petits*, de ces *monades*, pour employer une expression célèbre, et leur ensemble doit équivaloir à un milieu *physiquement* continu; de cette façon, les espaces interplanétaires seraient occupés par une matière formée d'éléments en état de répulsion, et cela revient à admettre un fluide universel soustrait à l'influence de la gravité. On peut appliquer à ce fluide les vers consacrés par Lucrèce à l'air atmosphérique[1] :

> Semper enim quodcumque, fluit de rebus, id omne
> Aeris in magnum fertur mare; qui nisi contra
> Corpora retribuat rebus recreetque fluentis
> Omnia jam resoluta forent et in aere versa.

Cette matière, très-atténuée, doit, par sa pression, agir sur tout, et produire dès lors les effets attribués par d'autres à l'action de l'éther. Enfin, si l'espace est rempli par cette matière, comment pourra-t-elle ne point participer aux mouvements qui s'y produisent? comment pourra-t-elle ne pas être ébranlée par les vibrations des corps chauds et des corps lumineux? Et si cette communication de mouvement s'établit, qui pourrait distinguer cette matière de l'éther?

Ajoutons encore que les défenseurs de cette doctrine sont forcés d'admettre à chaque instant des forces tantôt attractives, tantôt répulsives, au moins pour expliquer la formation des molécules. L'existence de l'éther une fois reconnue, toutes ces hypothèses deviennent inutiles.

[1] Livre V, v. 276.

Après la discussion à laquelle nous venons de nous livrer, on reconnaît évidemment, je pense, combien sont peu éloignées les unes des autres toutes ces opinions qui, au premier aspect, semblent diamétralement opposées, et surtout on peut voir combien sont peu raisonnables les personnes qui ont essayé de faire tomber en défaveur et même de couvrir de ridicule le système basé sur l'existence de l'éther. Assurément l'hypothèse d'un milieu universel a fait faire un pas immense à la théorie de l'unité des forces physiques en démontrant que de nombreux phénomènes, attribués à l'action de fluides divers, étaient de simples modes du mouvement de la matière pesante; néanmoins il ne serait pas logique de vouloir envisager toute la physique sous ce point de vue, et dans l'analyse des faits que nous développerons plus tard, nous serons ramenés à l'hypothèse de l'éther par des considérations d'un ordre tout différent, tirées de l'étude de l'électricité. Un éminent physicien a écrit que l'idée d'éther ou de fluide n'est pas plus claire que celle de *force*[1] : tout au contraire, nous regardons comme inadmissible l'idée de force introduite dans l'explication des phénomènes naturels, si on ne l'envisage pas comme une propriété inhérente à un certain support; mais, pour un fluide, il n'en est pas ainsi, quand même on le suppose intangible et impondérable (l'air n'a-t-il pas été considéré comme tel pendant longtemps?) : si ce fluide est en mouvement, sa masse à elle seule par sa vitesse devient déjà une *force*. Nous allons montrer comment notre hypothèse permet d'aborder avec facilité la théorie des phénomènes physiques, et nous espérons prouver que l'éther, admis d'abord pour rendre compte des manifestations lumineuses, peut aider beaucoup à l'intelligence de plusieurs autres résultats d'observations.

Nous chercherons à reconnaître les propriétés de cet

[1] Grove, *Corrél. des forces physiques*, p. 127.

agent universel en recourant exclusivement à l'expérience et à l'analyse successive des faits; nous commencerons donc par discuter ceux qui établissent la matérialité et l'inertie de l'éther, puis nous examinerons comment on a pu obtenir des indications sur la constitution et le mode d'action de ce fluide.

CHAPITRE IV

MATÉRIALITÉ DE L'ÉTHER : ÉCHANGES DE MOUVEMENT ENTRE CE FLUIDE ET LA MATIÈRE PONDÉRABLE : POUVOIR ABSORBANT DES CORPS POUR LA LUMIÈRE.

Nous avons jusqu'à présent regardé l'éther comme un fluide élastique, nous réservant de chercher plus tard quelle était la nature de cette élasticité. De plus, nous avons reconnu qu'il se comportait toujours comme une matière inerte; aussi, à notre avis, l'expression *fluide immatériel*, appliquée à l'éther, est-elle défectueuse, quand même on l'emploierait seulement pour montrer qu'il est d'une nature contraire à celle de la matière pesante; cette locution prêtera toujours à l'équivoque.

L'éther pénétrant tous les corps, on ne peut constater son poids, car il arrive pour le fluide ce qui se présenta pour l'air, dont la pondérabilité ne fut pas soupçonnée jusqu'à ce que l'on eut imaginé des appareils propres à le condenser et à le raréfier; nous trouvant ainsi dans l'impossibilité de reconnaître la pondérabilité de l'éther, si nous voulons prouver sa matérialité, il nous reste à démontrer son inertie, c'est-à-dire sa résistance au mouvement. Quelques savants ont songé à constater cette résistance, en déterminant l'effet qu'elle devait exercer sur le cours des astres. Ainsi, ils attribuaient une grande importance aux perturbations éprouvées par

certaines comètes[1]. Ce mode de démonstration est sans valeur. En effet, il n'est pas complétement établi que les perturbations cométaires soient produites par la résistance d'un milieu, et dans le cas où telle en serait la cause, le milieu résistant pourrait être tout autre que l'éther; par exemple, ce pourrait être la substance qui forme la lumière zodiacale, ou des groupes de bolides[2], etc. De plus, aujourd'hui que l'on a découvert un nombre considérable de petites planètes entre Mars et Jupiter (100 jusqu'à ce jour[3]), est-on assuré que certaines d'entre elles ne puissent se trouver sur le chemin d'une comète et influencer son mouvement à la manière d'un milieu résistant? Ainsi, tout est incertitude de ce côté. Bien plus, il n'est pas rationnel de croire à une résistance exercée par l'éther, car cette matière, selon toute probabilité, est la cause efficiente de la gravité; par conséquent, les mouvements des corps célestes ne sauraient être troublés par elle. L'éther étant admis, il ne s'ensuit pas nécessairement qu'on doive donner à la gravité pour origine les trop fameux tourbillons cartésiens; pas davantage il n'est besoin de la supposer produite directement par les vibrations calorifiques ou lumineuses, car on peut très-bien concevoir un tout autre mode de développement sur lequel nous nous entendrons plus tard.

A notre avis, les actions moléculaires, beaucoup mieux que les phénomènes astronomiques, peuvent nous donner des preuves en faveur de l'inertie de l'éther, et, par suite, de sa matérialité.

1° Un corps chaud placé dans le vide se refroidit par rayonnement, c'est-à-dire sans aucune communication avec les autres corps pesants par contact immédiat. Alors le mou-

[1] Parmi les plus fameuses, on peut citer celle de Encke.
[2] Voy. Faye, *Comptes rendus*, 1861, et Plana, *Mém. Acad. di Torino*, vol. XXI.
[3] 1er août 1868.

vement se propage aux corps pondérables en se communiquant d'abord à la substance impondérable ambiante. En effet, on ne peut expliquer le refroidissement par un anéantissement de mouvement dans le corps rayonnant, puisqu'une partie de la vibration calorifique se transmet aux objets éloignés; nous disons se transmet, sinon il faudrait supposer une création de mouvement dans ces objets sous l'influence de la seule présence des corps chauds. Dans ce phénomène, nous voyons la force vive appartenant à une quantité déterminée de matière sensible abandonner celle-ci et se communiquer à la matière impondérable; donc, cette dernière doit avoir une masse définie inappréciable aux balances, il est vrai, mais qui n'en est pas moins parfaitement réelle.

Le soleil est pour nous le foyer le plus intense de radiation calorifique, sa puissance de rayonnement devrait donc diminuer avec les années si ses pertes journalières n'étaient pas incessamment compensées. Sa température est énorme, Waterston en estime la valeur potentielle à 6,700,000 degrés centigrades; d'après cet auteur, en tenant compte des pertes qu'il éprouve continuellement, elle devrait diminuer de 3 degrés par année. D'après les données fournies par Pouillet, on trouve que chaque mètre carré de la surface du soleil émet 13,610 calories par seconde, quantité de chaleur équivalente à 3,791,840 kilogrammètres, soit 77,232 chevaux vapeur. Cette immense force est employée à tenir l'éther environnant en mouvement.

Réciproquement, le mouvement de l'éther peut se communiquer à la matière pesante; ainsi, la lumière, qui s'éteint en rencontrant la surface d'un corps, se transforme en chaleur, de sorte que les corps noirs, et en général ceux dont le pouvoir réflecteur est très-faible, s'échauffent plus facilement que les autres. La quantité de chaleur absorbée est ordinairement proportionnelle à la lumière éteinte. Mais ce rapport peut changer complétement avec la nature

des radiations, d'une part, et les propriétés moléculaires des corps, de l'autre. Ainsi, un cristal d'alun parfaitement transparent absorbe la chaleur presque totalement, et, au contraire, un verre noir et opaque ou un quartz enfumé à peine translucide laisse passer les rayons calorifiques avec la plus grande facilité. Ces phénomènes, analogues à ceux présentés par les couleurs, nous montrent qu'il existe des rayons calorifiques de différentes qualités comme des rayons lumineux de différentes couleurs, de sorte que l'on doit, avec Melloni, admettre la *thermochrose*[1].

Pour mieux mettre en relief les échanges de mouvement qui peuvent s'accomplir entre l'éther et la matière pesante, il est bon de rappeler sommairement les découvertes récentes faites à l'aide du spectroscope[2]. En examinant au moyen de cet instrument un corps solide incandescent, on obtient un spectre continu sans aucune des raies transversales qui existent dans le spectre solaire; si on élève alors la température à un point suffisant pour déterminer la combustion de quelques-uns des éléments du corps, aussitôt on voit apparaître des raies lumineuses diversement colorées, suivant la nature de la substance en ignition. Ces raies sont séparées par des espaces obscurs; quelquefois elles sont fort peu nombreuses, il peut même ne s'en présenter qu'une seule, mais constamment le spectre est discontinu et d'un aspect caractéristique pour chacun des corps simples. Or-

[1] Thermochrose : θέρμη, chaleur; χρώζω, colorer.

[2] Le spectroscope (fig. 14) est formé par un ou plusieurs prismes très-purs que l'on fait traverser par un faisceau de lumière parallèle. Le parallélisme des rayons s'obtient soit en introduisant le faisceau par une ouverture très-étroite située à une assez grande distance des prismes, soit à l'aide d'un objectif achromatique placé à une moindre distance dans le tube C. Le spectre obtenu est observé directement à l'œil nu, ou mieux encore avec une lunette B. Pour permettre la mesure de la distance des raies, l'image du spectre se projette sur une échelle micrométrique qui, disposée dans le tube B, est éclairée à l'aide d'une fente pratiquée à l'extrémité du tube opposé au prisme.

dinairement, les spectres obtenus dans ces circonstances sont mixtes, c'est-à-dire que les raies brillantes se détachent sur un fond lumineux, car la substance qui entre en combustion est toujours mêlée à quelques parcelles de matière étrangère portées simplement à l'incandescence[1]. La production des raies s'obtient avec toute la netteté désirable lorsque la combustion s'opère au sein de la lumière



Fig. 14.

[1] Dans la flamme des lampes à huile dans celle du gaz d'éclairage, les raies sont visibles seulement dans la partie inférieure violette, zone dans laquelle la combustion est très-active et qui est formée par l'oxyde de carbone; le reste de la flamme est constitué simplement par du charbon incandescent. Au contraire, la flamme du bois et du papier produit une raie jaune brillante, qui est celle du sodium; les autres parties du spectre appartiennent au charbon incandescent.

électrique produite par le courant d'une pile [1]. Pour plus de facilité, on peut employer les courants d'induction, mais les lignes ne sont ni aussi pures, ni aussi nettes. Ces vibrations se manifestent avec une telle précision, qu'elles ont permis la découverte de nouveaux corps simples dont l'existence a été révélée par l'apparition de raies lumineuses qui n'appartenaient à aucun des éléments connus auparavant. Faisons remarquer, à ce propos, que le genre de la vibration dépend non-seulement de la nature de la substance, mais encore de la température à laquelle cette substance est portée. Ainsi, le thallium, chauffé à un degré suffisant pour brûler dans l'air, présente une raie verte, et chauffé plus fortement (Miller), ou introduit dans l'arc voltaïque (Grove), il donne d'autres raies; de même pour le sodium et quelques autres corps. Les raies d'une substance varient encore suivant son degré de cohésion et sa densité. Ainsi, le spectre de la lumière électrique peut être continu ou présenter des raies si les charbons employés sont plus ou moins faciles à désagréger (Daniel), et, d'après les expériences de Robinson, lorsque, dans la flamme d'une substance, on introduit quelques parcelles d'une autre, on obtient des raies n'appartenant à aucune des deux.

Les recherches de Plüker ont mis hors de doute les faits suivants : 1° Quelques substances élémentaires peuvent donner deux spectres dont les lignes obscures ne présentent entre elles aucune relation. Ainsi l'azote traversé par de faibles décharges nous offre un spectre magnifique, formé de nombreuses larges raies ou zones principales, présentant toutes des stries très-fines, et cette lumière se répand sur toute l'étendue du spectre; seulement les zones comprises entre le rouge et le vert sont les plus larges, et celles placées au delà du vert sont les plus étroites; 2° mais

[1] Voy. le journal intitulé : *Nuovo Cimento del Matteucci*, anno 1. 1852.

si l'on augmente la puissance de la décharge en faisant usage d'une machine plus énergique et munie d'un condensateur, d'une bouteille de Leyde par exemple, on obtient un spectre, formé exclusivement de lignes brillantes sur un fond obscur, le passage d'un spectre à l'autre se fait avec une discontinuité parfaitement marquée. Le soufre et le carbone fournissent des résultats semblables, et avec ce dernier suivant la température, de nouveaux groupes de raies s'ajoutent aux premiers. Le spectre type de la vapeur de carbone paraît être celui du cyanogène brûlant dans l'oxygène.

Or l'interposition d'une bouteille de Leyde dans le circuit électrique a pour résultat un échauffement considérable du gaz, et tel que la température atteint un degré difficile à produire par un autre moyen; les phénomènes observés sont donc un effet de la très-grande élévation de température. Ces puissantes décharges ne modifient pas la structure intérieure du gaz; la preuve en est que l'on peut plusieurs fois de suite avec un même tube obtenir l'un ou l'autre spectre. Il se manifeste donc alors une modification dans les vibrations moléculaires analogues aux changements allotropiques. Sous l'influence des étincelles électriques un grand nombres de gaz composés se décomposent et restent décomposés, dans certains autres les éléments se séparent seulement au moment du passage de l'étincelle et se recombinent aussitôt après. En présence de ces faits, on est tenté de croire que les raies des corps qui donnent deux spectres sont dues à une dissociation réelle des gaz, lesquels ne seraient pas des corps simples dans le véritable sens du mot. Cette dissociation se maintient seulement pendant que la température reste très-élevée; nous avons déjà vu dans notre chapitre sur la dissociation semblable chose arriver à la vapeur d'eau.

L'hydrogène, selon Plüker, ferait exception, son spectre devenant continu seulement aux températures élevées ob-

ant une comparaison à l'acoustique, nous
emier état est analogue à celui d'un corps
naissance à un bruit, c'est-à-dire à des
onfuses, parce qu'elles coexistent à tous
bles de longueur ; les corps présentant le
vent être rapprochés de ceux qui rendent
ux, des cordes vibrantes, par exemple.
orps animé d'un mouvement vibratoire
z rapide pour le rendre lumineux, mais
déterminer sa combustion ou sa volatilisa-
, les liens moléculaires résistant encore.
présentent toutes les longueurs possibles,
s plus courtes, qui, par contre, peuvent
tions chimiques. Imaginons maintenant
lu mouvement intérieur augmente à un
n résulte la vaporisation des corps et que
ennent l'état de répulsion réciproque qui
ccompagne ou précède les combinaisons
les substances élémentaires; aussitôt le
atoire se régularise, prend un rhythme
éristique de la substance elle-même. Or
e, pour obtenir ces phénomènes ultimes,
nt placer la matière dans cet état dit ré-
sente au moment où elle se vaporise, ou
prend part à une réaction chimique; alors
olécules, dégagées de tout lien, isolées,
vibrent en complète liberté, chacune sui-
spécial dépendant de sa masse et de son
.

le libre paraît avoir une vibration qui lui
minée par sa masse et sa force vive, c'est-
mpérature; peut-être cette vibration se
sieurs autres par l'effet des variations de
ujours est-il qu'elle ne se présente sous
ue si la molécule est absolument libre. Il

tenues par de fortes décharges. Mais ce fait présente encore quelque incertitude, car avec un gaz à faible tension sans employer ni fente ni lunette, à l'aide d'un simple prisme on observe un spectre qui approche beaucoup d'être continu, tandis que, en se servant d'un appareil muni de tous ses accessoires, on ne voit que trois raies. Dans les études spectroscopiques, on n'a pas encore parfaitement déterminé le degré d'influence que peut avoir *l'intensité* de la lumière des diverses raies, la mesure photométrique n'en ayant pas encore été faite ; aussi est-il permis de conserver quelques doutes sur certains résultats partiels. Néanmoins il reste constant que ces raies se forment exclusivement lorsqu'on opère sur les corps réduits à l'état de vapeur ; résultat conforme à cette proposition énoncée ailleurs : au commencement de toute combinaison chimique, avons-nous dit, la matière se constitue dans un état de volatilisation spéciale. En outre, ces faits nous portent à croire que les corps regardés comme simples jusqu'à aujourd'hui éprouvent probablement une dissociation temporaire durant le passage de puissantes étincelles.

La richesse du spectre solaire en raies lumineuses est telle, qu'à la simple vue il nous paraît continu ; mais, en l'examinant avec le spectroscope, on a reconnu que cette continuité apparente n'existe réellement dans aucune de ses parties.

Les raies lumineuses, très-abondantes, sont dues à l'immense variété des matières incandescentes qui forment le soleil et à sa prodigieuse température ; les raies obscures résultent de l'absorption de certains rayons par l'atmosphère solaire. Nous démontrerons ces propositions un peu plus loin.

Les observations précédentes conduisent à admettre dans les corps deux états lumineux : un de simple incandescence et l'autre de volatilisation ou d'activité chi-

mique. Empruntant une comparaison à l'acoustique, nous dirons que le premier état est analogue à celui d'un corps lorsqu'il donne naissance à un bruit, c'est-à-dire à des ondes sonores confuses, parce qu'elles coexistent à tous les degrés possibles de longueur ; les corps présentant le second état peuvent être rapprochés de ceux qui rendent des sons musicaux, des cordes vibrantes, par exemple. Supposons un corps animé d'un mouvement vibratoire moléculaire assez rapide pour le rendre lumineux, mais insuffisant pour déterminer sa combustion ou sa volatilisation, en un mot, les liens moléculaires résistant encore. Alors les ondes présentent toutes les longueurs possibles, à l'exception des plus courtes, qui, par contre, peuvent provoquer les actions chimiques. Imaginons maintenant que l'intensité du mouvement intérieur augmente à un point tel, qu'il en résulte la vaporisation des corps et que les molécules prennent l'état de répulsion réciproque qui ordinairement accompagne ou précède les combinaisons chimiques entre les substances élémentaires; aussitôt le mouvement vibratoire se régularise, prend un rhythme spécial et caractéristique de la substance elle-même. Or il est évident que, pour obtenir ces phénomènes ultimes, il faut absolument placer la matière dans cet état dit répulsif qu'elle présente au moment où elle se vaporise, ou bien lorsqu'elle prend part à une réaction chimique; alors seulement les molécules, dégagées de tout lien, isolées, pour ainsi dire, vibrent en complète liberté, chacune suivant un rhythme spécial dépendant de sa masse et de son degré d'élasticité.

Toute molécule libre paraît avoir une vibration qui lui est propre, déterminée par sa masse et sa force vive, c'est-à-dire par sa température; peut-être cette vibration se subdivise en plusieurs autres par l'effet des variations de température. Toujours est-il qu'elle ne se présente sous sa forme vraie que si la molécule est absolument libre. Il

en est de même en acoustique : un corps rend-il des sons musicaux très-purs, que l'on gêne sa vibration, et aussitôt il fait entendre des bruits discordants. Aussi avons-nous dit (page 69) que d'après les observations spectrales dans les solides, certains groupes moléculaires très-probablement se désagrégent et passent à l'état élastique. La force répulsive électrique est celle qui agit le plus puissamment et le plus facilement pour produire cette volatilisation moléculaire. A quelles lois obéissent ces mouvements vibratoires? on l'ignore complétement, et toute hypothèse à ce sujet serait peu fondée; mais il est permis d'affirmer que la nature des oscillations est étroitement liée à la masse et à la force vive des molécules.

Voyons maintenant comment l'analyse spectroscopique nous fournit un moyen très-précieux de reconnaître les échanges réciproques de mouvement entre l'éther et la matière pesante.

Un corps incandescent examiné au spectroscope donne, comme nous le savons, un spectre continu; si on place entre ce corps et l'instrument une caisse de verre à faces parallèles remplie de vapeurs d'iode ou de vapeurs nitreuses, aussitôt apparaissent un grand nombre de raies obscures tout à fait semblables à celles du spectre solaire. Dans cette expérience, on voit la vapeur interposée absorber manifestement certaines ondes et en laisser passer d'autres très-peu différentes des premières. Dans l'absorption des ondes lumineuses, les vapeurs ne se comportent pas précisément comme les milieux solides colorés, car elles exercent leur action sur des ondes comprises dans des limites parfaitement distinctes, tandis que pour les solides les zones d'absorption sont plus étendues, et leurs limites sont moins nettement déterminées, mais au fond les deux phénomènes reconnaissent une même origine.

Cette propriété absorbante n'est pas spéciale aux deux gaz cités plus haut; elle semble être plus ou moins dé-

veloppée dans tous les corps amenés à l'état de vapeur, qu'ils soient à une température insuffisante pour les rendre lumineux ou non. Mais, lorsqu'ils sont portés à l'incandescence, il peut se présenter de curieux phénomènes; exemple : si avant de pénétrer dans le spectroscope un faisceau lumineux émané du soleil ou des charbons polaires de l'arc voltaïque traverse une flamme d'alcool salé, on verra se développer dans le spectre une raie noire très-marquée à la place de la raie D de Fraünhofer (Foucault). Les vapeurs de strontium de fer et d'autres métaux produisent des effets semblables, mais en des points différents du spectre (Bunsen). Pour obtenir ce résultat, il est une condition indispensable : la lumière qui traverse la flamme doit être plus intense que cette dernière; supposons que l'on place une flamme de sodium sur le trajet d'un rayon de lumière solaire diffuse, et qu'ensuite on fasse passer dans un prisme le faisceau lumineux ainsi obtenu, on voit la raie jaune du sodium se détacher brillante sur la raie noire appartenant au spectre solaire. Si l'on répète la même expérience avec un rayon solaire direct, la région du spectre correspondant à la raie D sera complétement obscure, car la lumière du sodium est trop faible pour briller autant que le reste du spectre solaire direct.

Ces phénomènes, désignés sous le nom d'*inversion du spectre*, nous conduisent à la loi suivante : une substance à l'état de vapeur absorbe exclusivement les rayons qu'elle émet en brûlant, et, en général, le pouvoir absorbant et le pouvoir émissif des rayons sont corrélatifs. Tyndal, dans ses recherches sur le rayonnement relatif et la thermochrose des gaz, avait déjà formulé cet énoncé dont l'exactitude a été reconnue, pour le cas des solides, par La Provostaye et Desains.

La conclusion à tirer des faits précédents est évidente : 1° l'éther peut propager toutes les vibrations des corps,

quelles que soient leur espèce et leur longueur, et si les vibrations d'un corps sont en nombre déterminé et limité, il en sera de même pour les ondulations éthérées correspondantes; 2° toutes les fois que les molécules du corps pesant peuvent accomplir un mouvement semblable à celui dont l'éther est animé, la force vive de l'éther sera absorbée, car elle se communiquera à la matière pondérable elle-même. Or, toutes les particules d'un corps ne peuvent pas vibrer à l'unisson des ondes éthérées, et cette faculté se rencontre seulement dans un certain nombre d'entre elles, ayant une masse et un volume déterminés, de telle sorte que l'éther communiquera sa force vive à celles-là à l'exclusion des autres, qui ne participeront nullement au mouvement. Ces phénomènes de résonnance lumineuse sont tout à fait comparables à ceux observés par les musiciens sur les instruments à cordes. Dans le voisinage d'une harpe, on produit un son, aussitôt celles des cordes de l'instrument qui peuvent résonner à l'unisson entrent en vibration, et les autres restent silencieuses. Dans ce cas, les cordes ébranlées ont reçu la force vive nécessaire à leur mouvement de l'air qui propageait les ondes sonores.

Le fait dont nous nous occupons actuellement étant d'une importance primordiale dans notre théorie doit être analysé avec soin. Prenons pour exemple l'inversion par la flamme du sodium du spectre fourni par les charbons polaires d'une batterie voltaïque : en superposant les deux flammes, nous développons deux mouvements ondulatoires sur une même ligne droite; dans le premier, c'est-à-dire dans celui qui émane du sodium en ignition, les ondes éthérées ont la longueur de celles qui correspondent à la raie D obscure dans le spectre solaire, soit $0^{mm},0006$. Désignons par Mv^2 la force vive de cette oscillation. De leur côté, les charbons électriques émettent des ondes de même longueur, mais d'une intensité

différente, soit MV^2. Lorsqu'elles traversent la flamme du sodium, les molécules de ce métal étant susceptibles de vibrer à l'unisson, seront mises en mouvement en empruntant aux ondes de l'éther la force vive nécessaire, quantité qui sera généralement une partie aliquote de la force vive de l'onde lumineuse émise par les charbons, car dans le sodium la masse d'une molécule est notablement plus grande que dans l'éther. Représentons cette fraction par $\frac{1}{K} Mv^2$. Alors la somme des forces vives appartenant aux molécules sodiqués en vibration est $Mv^2 \left(1 + \frac{1}{K}\right)$. Si cette somme égale MV^2, il n'y aura ni augmentation ni diminution de l'intensité lumineuse; mais une variation d'intensité se produira toutes les fois que l'une des deux quantités surpassera l'autre ou lui sera inférieure. Dans le cas où il y aura extinction de lumière, elle ne sera jamais que relative, car elle ne pourra pas être aussi complète que celle obtenue par interférence. On comprend alors pourquoi les raies d'absorption peuvent être *nébuleuses*, c'est-à-dire incomplétement noires. Ainsi se présentent les raies atmosphériques, terrestres et plusieurs autres qui se voient dans les spectres stellaires. Ces raies n'acquièrent jamais la teinte noire foncée des raies métalliques.

Ces faits démontrent l'inertie de l'éther, par conséquent sa matérialité. Ils nous fournissent également un principe pour expliquer l'absorption des rayons par un grand nombre de corps, et l'égalité des pouvoirs absorbants et émissifs d'une même substance, car nous admettrons désormais que les molécules absorbent la force vive des ondes dont le rhythme vibratoire est le même que celui de leurs propres oscillations.

Cependant il faut reconnaître que ce seul principe ne suffit pas pour expliquer tous les cas d'absorption de

lumière ; mais les exceptions peuvent être attribuées aux irrégularités de la forme des molécules du corps transparent.

Cette influence nous semble démontrée par les beaux travaux de Tyndall : il a établi que le pouvoir absorbant des gaz augmentait d'intensité à mesure que la structure moléculaire devenait plus compliquée. Ainsi la vapeur d'eau absorbe soixante fois plus qu'une masse égale d'hydrogène et d'oxygène[1]. De même le pouvoir absorbant de l'ammoniaque vaut cent cinquante fois celui des gaz qui entrent dans sa composition. Enfin le gaz oléfiant, les principes odorants des fleurs, les vapeurs des divers alcools et éthers, sont des corps dont le pouvoir absorbant est porté à un très-haut degré, et le savant physicien n'hésite pas à attribuer cette propriété à la complication de leur molécule chimique. On peut, jusqu'à un certain point, expliquer ce résultat; il est facile aux ondes de l'éther de contourner les molécules des gaz indécomposables à cause de la forme de ces molécules qui, très-probablement, est une forme sphérique ou, tout au moins, celle d'un solide géométrique très-simple. Au contraire, dans les corps d'une structure compliquée, les molécules sont anguleuses, polyédriques, et dès lors les mouvements vibratoires s'éteignent rapidement, de même que les corps mous et filamenteux assourdissent le son, et que les écueils forment obstacle à la propagation des vagues de l'Océan et les brisent.

Lorsqu'une onde lumineuse s'éteint, sa force vive ne s'anéantit pas, mais il y a transformation de travail : une

[1] Tyndall, *Philos. trans.*, 1862. Magnus a contesté l'exactitude de ce nombre 60, et d'après lui le pouvoir absorbant de la vapeur serait 5 à 6 fois celui de l'air atmosphérique. Nous nous sommes livrés à quelques recherches pour éclaircir ce point douteux, et à la suite d'expériences faites en été et en hiver sur l'absorption de la chaleur solaire, nous sommes arrivés aux conclusions de M. Tyndall.

vibration plus lente est imprimée à toute la masse du corps pesant et se traduit au dehors soit par une élévation de température, soit par une désagrégation des molécules composées, dont les atomes élémentaires sont dissociés. On dit alors que la lumière opère une décomposition chimique; ces décompositions photogéniques sont très-remarquables et elles doivent nous arrêter un instant. Nous en ferons l'objet du chapitre suivant; pour le moment, nous présenterons quelques réflexions intéressantes ayant trait au sujet dont il vient d'être question.

Le spectroscope nous fournit une des preuves les plus splendides de l'identité de la matière dans l'univers: car il nous permet de soumettre les astres à l'analyse chimique la plus délicate en examinant simplement, suivant des procédés spéciaux, la lumière qu'ils nous envoient. On a reconnu ainsi qu'il y a unité de composition chimique entre les diverses parties du monde céleste. Au point de vue de l'analyse spectrale, toutes les étoiles peuvent être ramenées à quatre types principaux :

Premier type. — Les étoiles blanches, telles que Sirius et α de la Lyre, les brillantes β, γ, δ, ϵ, ζ, de la grande Ourse, etc. Le spectre de ces astres est presque continu, cependant on y distingue trois raies noires assez larges, l'une est dans le rouge au niveau de la raie solaire C, l'autre dans le vert bleu et coïncide avec la raie solaire F; la troisième, située dans le violet, est voisine de la raie solaire G. Ces trois raies sont les raies principales renversées de l'hydrogène. Les étoiles très-brillantes donnent une quatrième raie dans le violet un peu plus loin que la précédente. Il existe aussi des raies très-fines dans le vert et le jaune, mais on les distingue avec peine. Toutefois, si le spectre paraît continu, cela tient à l'insuffisance du grossissement sous lequel on peut l'observer. En effet, la lumière des étoiles étant très-faible, il est impossible de recourir à de puissants instruments; et si

cette difficulté n'existait pas, très-probablement on observerait de nouvelles raies qui nous échappent à cause de leur finesse.

Deuxième type. — Les étoiles jaunes, exemple : Pollux, la Chèvre, Arcturus, etc. Ces étoiles donnent un spectre identique à celui de notre soleil ; les raies sont aussi distinctes et en nombre égal, de plus elles occupent les mêmes positions relatives.

Troisième type. — Les étoiles rouges, parmi lesquelles se trouvent α d'Orion, α d'Hercule, β de Pégase et d'autres. Leur spectre présente deux sortes de raies parfaitement distinctes. Les unes ne sont que les raies ordinaires du spectre solaire, seulement elles ont une plus grande largeur, et sont mieux accentuées, circonstance qui fait croire à une absorption plus énergique des substances caractérisées par ces raies. Les raies du fer en particulier sont très-intenses. Outre ces raies ou lignes fines, on remarque des zones sombres semblables à celles qui sont produites dans le spectre solaire par l'atmosphère terrestre et sont nommées raies nébuleuses ; vraisemblablement elles sont de même nature que ces dernières, car elles ne peuvent être décomposées en lignes fines. Ces deux classes de raies sont parfaitement distinctes, et il ne faut pas confondre les *zones* avec les raies ou stries.

Quatrième type. — Quelques étoiles rouges présentent un aspect différent de celui des étoiles appartenant au troisième type, si bien que ces astres forment réellement un nouveau groupe. On observe dans le spectre qu'elles fournissent un petit nombre de lumineuses stries assez vives et séparées par de larges espaces colorés. Ordinairement il existe trois zones très-distinctes : une dans le rouge, l'autre dans le vert et une troisième dans le bleu. Les limites des couleurs coïncident avec les lignes noires du carbone. On est par là porté à croire que les zones noires de ces étoiles sont produites par une absorption

énergique exercée dans leur atmosphère, principalement par cette substance. Il est bon de rappeler que les étoiles rouges sont ordinairement variables.

Les nébuleuses donnent un spectre complétement différent de celui des étoiles. Il se réduit à trois lignes brillantes : l'une d'elles, qui est la plus vive, appartient au système du gaz azote; une autre occupe la place de la raie solaire F, laquelle se rapporte à l'hydrogène; la troisième est inconnue.

Le spectre des comètes est tout spécial; il est formé de trois zones une verte vive, l'autre violette, la dernière jaune. Il a été difficile jusqu'à présent de déterminer au juste la nature de ces raies; elles se rapprochent suffisamment de celles des nébuleuses (sans toutefois coïncider avec elles) pour que l'on soit autorisé à regarder les comètes comme de véritables nébuleuses ; et à leur attribuer une lumière propre. La comète de Winnecke, en 1868, présentait le spectre du carbone dans le carbure CH. Or le carbone ayant été trouvé dans plusieurs aérolithes, les découvertes montrent que la matière qui existe aux confins de l'espace ne diffère pas en nature de celle que nous manions chaque jour. En diffère-t-elle par l'état moléculaire? C'est là ce dont il est difficile de se faire une idée exacte. Nous avons déjà, dans un chapitre précédent, dit quelques mots sur l'état de dissociation dans lequel se trouve probablement la matière des comètes : les résultats fournis par l'analyse spectrale confirment la vérité de nos assertions.

CHAPITRE V

ACTIONS CHIMIQUES PRODUITES PAR LA LUMIÈRE FLUORESCENCE, PHOSPHORESCENCE

La lumière produit des combinaisons et des décompositions. Ainsi, lorsqu'un sel d'argent est exposé aux rayons

solaires, il noircit, parce que le sel est décomposé : le métal reste sous forme d'une poudre très-ténue, et les autres éléments, réagissant les uns sur les autres, forment une nouvelle combinaison. Après l'impression lumineuse, toute portion du sel qui n'a pas été décomposée peut être dissoute par l'hyposulfite de soude ou le cyanure de potassium, tandis que les mêmes sels n'exercent aucune action sur le métal réduit. La photographie repose tout entière sur ces réactions.

Réciproquement nous trouvons un exemple de combinaison directement excité par l'influence lumineuse dans la synthèse de l'acide chlorhydrique. En effet, un mélange de chlore et d'hydrogène exposés au soleil, se combine avec détonation. Bunsen et Roscoe, en diminuant convenablement la violence de cette réaction, l'ont utilisée pour mesurer l'énergie chimique des rayons lumineux ; ils ont constaté que l'éclat d'une lumière diminue toutes les fois qu'elle détermine une combinaison. Donc une partie de la force vive de l'onde se convertit en travail chimique.

Nos lumières artificielles présentent, elles aussi, des rayons éclairants, des rayons calorifiques et des rayons chimiques; mais ces derniers sont très-peu nombreux, et d'autre part le pouvoir calorifique l'emporte de beaucoup sur le pouvoir éclairant. Pour le gaz d'éclairage, on a calculé en équivalents mécaniques l'éclat et la chaleur en prenant pour intermédiaire la quantité de calorique dégagée lors de la synthèse de l'acide chlorhydrique, et l'on a trouvé que la première valeur était à peine le tiers de la seconde[1]. Les rayons chimiques existent en plus grande proportion dans les étincelles électriques des machines ordinaires, dans la lumière émise par les charbons polaires d'un courant voltaïque, et dans les flammes qui accompagnent les combustions très-violentes. Un fil de ma-

[1] *Philos. trans.*, 1859, p. 890

gnésium brûlant à l'air et se transformant en magnésie nous offre le foyer lumineux le plus vif après la lumière électrique; il équivaut à une surface solaire ayant un diamètre égal à la grandeur apparente du fil, lorsque cet astre est à 9° de hauteur au-dessus de l'horizon. Mais les propriétés chimiques et éclairantes de cette flamme sont loin d'être proportionnelles. En effet, l'éclat du soleil est à celui de la flamme du magnésium : : 325 : 1, tandis que le rapport des actions chimiques de ces deux sources est seulement de 37 : 1; réciproquement, la lumière électrique est très-riche en rayons chimiques comparativement à celle du soleil; cependant son degré thermométrique est, d'après Becquerel, à peine égal à 2070°, température bien inférieure à celle attribuée au soleil[1].

Bunsen et Roscoe ont montré que la lumière solaire qui arrive aux limites supérieures de notre atmosphère est capable dans chaque minute de temps de transformer en acide chlorhydrique une colonne d'un mélange hydrochloré, ayant pour base la surface éclairée et 35 mètres de hauteur; mais de ces rayons chimiques, un tiers seulement arrive jusqu'à la surface terrestre; le reste est absorbé par l'atmosphère. Il nous serait facile de déterminer l'équivalent mécanique de cette force, sachant que la chaleur dégagée par la combinaison de 1 centimètre cube d'hydrogène avec le chlore peut élever 1 gramme d'eau de 2°,08; mais sans faire le calcul, on voit facilement que le résultat serait un nombre énorme.

Depuis longtemps, les botanistes avaient reconnu que la lumière est nécessaire au développement de la chlorophylle dans les plantes, et que, grâce à cette action, elles peuvent croître et se reproduire. La lumière exerce donc une influence considérable sur la végétation, et il est admis

[1] Becquerel, *Ann. ch. et ph.*, III° série, vol. LXVII, p. 142.

désormais que les climats botaniques ne sont pas exclusivement déterminés par les lignes isothermes, et dans leur délimitation, il faut tenir grand compte de la distribution de la lumière solaire. Les nuages, en diffusant les rayons du soleil, agissent d'une manière très-efficace pour porter la fertilité dans tous les points qui, privés du rayonnement direct, seraient complétement stériles[1].

L'action chimique de la lumière ne se borne pas seulement aux phénomènes de la végétation et aux opérations de la photographie. Chacun a pu reconnaître combien était grande son influence sur la coloration de la peau des animaux, comment elle détruit un grand nombre de couleurs, tandis qu'elle favorise le développement de certaines autres : ainsi, les anciens préparaient la pourpre en avivant par l'exposition au soleil la teinte légère que présente la matière organique de certains mollusques. On peut donc s'étonner en voyant un phénomène aussi général complétement ignoré pendant très-longtemps, et en présence d'un fait semblable, il est permis de soupçonner l'existence d'un grand nombre d'autres forces encore complétement ignorées par nous, tant est grande l'imperfection de nos connaissances en philosophie naturelle.

Il est intéressant de rappeler ici la double série de phénomènes diamétralement opposés que présentent les deux règnes des êtres vivant sur la terre, c'est-à-dire les animaux et les végétaux.

Les manifestations biologiques chez les animaux sont toujours accompagnées par des phénomènes d'oxydation, si bien que par le fait des combinaisons lentes, accomplies au sein de leur organisme, ils produisent 8,080 calories pour chaque kilogramme de charbon converti en acide carbonique. Il en résulte donc une force mécanique disponible, utilisée par eux pour travailler. Dans le végétal, au

[1] Bunsen et Roscoe, *Philos. trans.*, 1859, loc. cit.

contraire, il se produit une succession de désoxydations, et, par conséquent, chaque kilogramme de carbone, mis en liberté, doit absorber une quantité de travail égale à celle qu'il absorberait en se combinant à l'oxygène. Toute cette force vive lui est donnée par le soleil. La plante isole l'oxygène à l'état de pureté, mais il n'en est pas de même pour le carbone; ce corps, s'unissant à d'autres substances, donne naissance à des combinaisons généralement instables. Les composés ainsi formés sont brûlés par les animaux et transformés en d'autres d'une plus grande stabilité, en oxyde de carbone et acide carbonique, par exemple[1].

Les radiations obscures peuvent aussi exciter les réactions chimiques, mais généralement il est impossible ou tout au moins très-difficile de séparer les rayons chimiques dans le spectre des corps incandescents. Ces faits nous montrent que pour donner naissance à des rayons chimiques, la matière doit être amenée à l'état de molécules complétement isolées et libres. Nous trouvons donc encore ici la confirmation d'une loi déjà indiquée, à savoir que toute action chimique suppose une préalable atténuation de la matière, car pour vibrer de manière à engendrer des ondes tellement courtes, qu'elles puissent exciter les combinaisons et les décompositions chimiques, il faut des molécules matérielles amenées aux dernières limites de la ségrégation. Anciennement on avait refusé toute activité chimique aux rayons rouges et jaunes, mais cette proposition est inexacte, et les photographes savent parfaitement que ces rayons peuvent au moins continuer une réaction commencée par d'autres. Tyndall, ayant isolé

[1] Un grand problème social réclame l'attention des observateurs. La consommation du charbon comme combustible est énorme, les machines à vapeur seules jettent chaque année dans l'atmosphère 16 milliards de tonnes d'acide carbonique. Les forêts, qui de jour en jour disparaissent devant les progrès du défrichement, sont-elles capables de réduire cette masse énorme d'acide carbonique?

les rayons calorifiques obscurs des rayons lumineux en leur faisant traverser une dissolution d'iode dans le sulfure de carbone, n'a obtenu aucun effet chimique et seulement des phénomènes d'incandescence.

Les ondes très-courtes jouissent encore d'une autre propriété : elles peuvent exciter dans les corps des ondes secondaires, suffisantes pour leur permettre de rester lumineux après la disparition du foyer dont ils recevaient les rayons. Ce phénomène est connu sous le nom de *phosphorescence.* Tous les solides, les métaux exceptés, sont phosphorescents à un degré plus ou moins prononcé; certaines substances sont très-remarquables sous ce rapport : ainsi, le phosphore de Bologne, celui de Canton obtenu par la calcination du soufre avec des écailles d'huîtres, le spath-fluor, certains diamants, etc., brillent dans l'obscurité pendant un temps considérable. Avec la plupart des autres corps, le phénomène est encore sensible, seulement il dure un temps très-court. La phosphorescence fut regardée par les newtoniens comme une preuve très-concluante de la matérialité de la lumière, « car, disaient-ils, ce fluide est d'abord absorbé par les corps, puis il s'en échappe peu à peu[1]. » Mais cette supposition était erronée ; en effet, à supposer qu'elle fût vraie, la lumière émise par les substances phosphorescentes devrait avoir la même couleur et la même nature que celle dont elles ont subi tout d'abord l'influence ; or il n'en est rien, car chaque substance est inégalement impressionnée par les différents rayons du spectre. L'effet maximum est obtenu avec les rayons violets, et même avec les ultra-violets, c'est-à-dire à l'aide des rayons chimiques, et en outre la teinte émise par les phosphores correspond à des rayons d'une moindre réfrangibilité que ceux de la lumière active.

Un corps peut donc avoir été soumis à l'influence d'ondulations éthérées appartenant à un type déterminé, et

[1] Priestley, *op. cit.*, Per. VI, cap. II.

ses molécules rester animées de vibrations d'une autre espèce; de même un corps sonore, alors que toute excitation a disparu, nous fait souvent entendre des notes étouffées, véritables échos harmoniques du son fondamental. Pour appuyer notre opinion, nous rappellerons encore que la phosphorescence est plus vive et de plus longue durée lorsqu'elle se manifeste dans des espaces contenant seulement une matière très-raréfiée, et par suite sous une pression bien inférieure à celle de l'atmosphère, dans les tubes de Geissler, par exemple, les molécules jouissant alors d'une plus grande liberté. Cependant, rien ne prouve que dans ces circonstances d'autres forces, et spécialement l'électricité, ne jouent pas un certain rôle, d'autant plus que, chose remarquable, les phosphores sont constamment mauvais conducteurs de l'électricité, et d'un autre côté, la moindre trace d'humidité suffit pour empêcher la phosphorescence même dans les corps doués de cette propriété à un très-haut degré. L'action très-puissante de la lumière électrique pour exciter la phosphorescence pourrait bien tenir à sa très-grande richesse en rayons chimiques, et même nous serions assez portés à croire que par son action directe la lumière est capable de produire l'électrisation des corps, aussi bien que peuvent le faire les actions mécaniques les plus légères; de récentes expériences sont très-favorables à cette manière de voir, nous les citerons plus tard.

Les physiciens modernes ayant reconnu, par les faits précédents, que les molécules de la matière pesante pouvaient vibrer sous l'influence du mouvement de l'éther, ont proposé une nouvelle théorie de la coloration permanente des corps. Pour eux, la couleur d'un corps serait due à ce que ses molécules prendraient un mouvement vibratoire plus ou moins analogue à celui du rayon incident; aussi repoussent-ils la théorie de Newton, fondée sur les phénomènes des lames minces.

La phosphorescence se rapproche beaucoup d'une autre

classe de phénomènes dont nous allons dire quelques mots.

Les rayons chimiques n'exercent ordinairement aucune action sur l'œil; mais en tombant sur certaines substances ils deviennent visibles : tel est le fait nommé *fluorescence*. Alors les rayons deviennent visibles indirectement, car leur réfrangibilité est changée par l'action de la substance, comme l'on peut s'en assurer en regardant à travers un prisme une bande étroite d'une substance fluorescente; on voit la couleur se décomposer en plusieurs teintes à la manière de la lumière blanche. Il est donc impossible d'admettre ici le synchronisme des oscillations propres aux molécules matérielles, et de celles appartenant à l'onde éthérée diffusée par la surface du corps; or la même chose se présentant dans la phosphorescence, on est porté à réunir ces deux ordres de phénomènes sous un seul nom en les distinguant l'un de l'autre seulement, parce que dans les phosphores les nouvelles vibrations durent un certain temps après l'action excitatrice de la lumière, tandis qu'au contraire elles cessent immédiatement dans les corps fluorescents. Mais une semblable hypothèse exige que toutes les substances phosphorescentes soient fluorescentes au moins à un degré plus ou moins prononeé, et il n'en est pas ainsi dans la réalité; par conséquent, il est bon, à notre avis, de conserver les deux dénominations.

La fluorescence nous offre un exemple de la transformation d'ondes très-courtes en ondes plus longues. M. Tyndall a découvert le phénomène inverse, et lui a donné la nom de *calorescence*. Il expose un corps à l'action des rayons calorifiques invisibles du soleil et le corps devient lumineux, c'est-à-dire émet des ondes plus courtes que celles dont il a subi l'impression. Ces faits nous montrent que la matière pondérable peut réagir sur l'éther.

Aujourd'hui, les physiciens sont d'accord sur un point théorique fondamental : ils admettent que les phénomènes

dont nous nous occupons sont causés par une vibration particulière; mais sur les détails ils sont loin de s'entendre. Les uns, considérant que dans la fluorescence, par exemple, les ondes réfléchies sont moins réfrangibles que les ondes incidentes, comparent l'effet produit à celui connu en acoustique sous le nom de *battements*. On sait que si deux sons séparés par un faible intervalle résonnent simultanément, un troisième son ne tarde pas à se faire entendre plus grave que les premiers. Or, suivant l'opinion de ces physiciens, les vibrations moléculaires peuvent donner lieu à de semblables compositions de mouvement. Pour d'autres savants, les ondes de la fluorescence se développent exclusivement dans l'éther par une action de la matière pesante, de même que dans le phénomène de l'écho, des ondes *parallèles* à la surface réfléchissante, nommées encore ondes *fixes*, prennent naissance et restent parfaitement distinctes de celles qui, renvoyées régulièrement, ont éprouvée une simple réflexion. (Amgstroem.)

A notre tour, nous risquerons une explication. En regardant les vagues déferler sur la grève, nous avons fait cette remarque que lorsqu'elles approchent de la terre et que l'influence du fond se fait sentir, leur crête devient parallèle au rivage, puis elles se brisent et alors produisent des ondes réfléchies dont la longueur est toute différente de celle que présentait le flot venu de la haute mer. Or, qui nous empêche d'admettre que dans la fluorescence, les ondes de l'éther, en rencontrant certains corps, se brisent et donnent naissance à des ondes d'une réfrangibilité différente, puisque celles-ci sont diffusées par la surface réfléchissante; je dis diffusées, car il en est réellement ainsi de la lumière renvoyée par les substances fluorescentes, puisque ces corps sont visibles dans toutes les directions?

De nouvelles recherches sur ce point délicat permettront de trouver la véritable théorie des phénomènes. Pour le moment, faisons remarquer simplement : 1° que la com-

binaison des ondes de l'éther avec celles de la matière pesante peut donner naissance à des mouvements résultants différant de ceux auxquels ils sont dus; 2° qu'une production de lumière n'est pas toujours un effet d'une haute température, car pendant certaines réactions soit chimiques, soit moléculaires se développent quelquefois des ondes assez courtes pour impressionner le sens de la vue. Nous citerons comme exemples les lueurs dégagées par quelques insectes et mollusques marins, celles qui accompagnent l'oxydation lente du phosphore, la putréfaction des poissons et plusieurs autres phénomènes de combustion lente.

Jusqu'à présent, on n'a pas constaté l'existence d'actions mécaniques dues à l'influence directe de la lumière, à moins de regarder comme tels les faits observés par Poggioli sur les plantes *sensitives*, qui, exposées aux rayons directs du soleil, se ferment aussi complétement que si on les avait touchées avec un corps étranger [1].

Ajoutons que d'après les expériences de Becquerel, citées par Grove [2], que dans un grand nombre de cas une action mécanique suffit pour déterminer des réactions chimiques.

Mais si par leur action directe les radiations lumineuses ne sont point capables de produire des effets mécaniques, elles sont indirectement la cause de phénomènes de ce genre extrêmement nombreux, et nous devons dire quelques mots à ce sujet.

[1] Voy. Œuvres de Poggioli. Rome, 1862.

[2] *Corrélat. des forces physiques.*

CHAPITRE VI

RÉFLEXIONS SUR LES EFFETS MÉCANIQUES DES RADIATIONS LUMINEUSES. HYPOTHÈSE SUR LA STRUCTURE INTÉRIEURE DES CORPS DÉDUITE DE LA THÉORIE DE L'ÉTHER.

Dans les chapitres précédents, nous avons réuni un grand nombre de faits relatifs à la chaleur et aux réactions chimiques et nous avons fait voir peu à peu qu'ils se réduisent à de simples phénomènes de mouvement; il convient maintenant d'envisager ces questions à un point de vue général.

La force vive des radiations solaires calorifiques et chimiques peut se communiquer à la matière pesante en produisant un travail intérieur; ce travail est double, il comprend un certain effet thermique et une action chimique.

D'abord la première impression des radiations solaires sur la matière pesante consiste dans l'élévation de la température, c'est-à-dire dans l'accroissement du calorique d'état. Le mouvement de l'éther étant convertible en mouvement des atomes matériels, réciproquement ceux-ci à leur tour peuvent communiquer leur agitation à l'éther. Or, d'ordinaire, un corps qui absorbe de la chaleur présente une température inférieure à celle de la source dont elle émane; il en résulte que les ondes solaires, de courtes, deviennent longues; mais celles-ci, ne pouvant pas traverser certains corps diaphanes (une couche d'air épaisse, par exemple, ainsi que l'a montré Melloni), une grande partie du mouvement solaire reste acquise à la masse pesante et à l'éther qu'elle renferme. Pour fixer les idées à ce sujet, nous rappellerons que sur la somme de radiations solaires arrivant aux limites supérieures de notre atmo-

sphère, un quart seulement pénètre jusqu'à nous, mais on peut regarder cette fraction comme absorbée et conservée par les corps terrestres et les couches inférieures de l'atmosphère.

A l'effet thermométrique succède un changement d'état; alors le travail absorbé est tout entier utilisé pour modifier l'arrangement moléculaire. Il est bon de rappeler ici comment Fresnel s'exprimait à ce sujet longtemps avant que les théories thermo-dynamiques fussent en grande faveur. « Il est probable que dans ces différents cas (d'absorption) une partie de la lumière se trouve dénaturée et changée en vibrations calorifiques qui ne sont plus sensibles pour nos yeux, parce qu'elles ne peuvent plus en pénétrer la substance ou faire vibrer le nerf optique à leur unisson, en raison des modifications qu'elles ont éprouvées[1]. Mais la quantité totale de la force vive doit rester la même, à moins que l'action de la lumière n'ait produit un effet chimique ou calorique assez puissant pour changer l'état d'équilibre des particules du corps, et avec lui l'intensité des forces auxquelles elles sont soumises, car on conçoit que si ces forces s'affaiblissaient tout à coup, il en résulterait une diminution subite dans l'énergie des oscillations des particules du corps chauffé, et par conséquent une absorption de chaleur, pour me servir de l'expression usitée. C'est peut-être ainsi que les choses se passent quand un corps solide se liquéfie ou quand un liquide se vaporise[2]. » Dans ce passage, Fresnel admet la transformation de la lumière en chaleur, et il indique, d'une façon un peu obscure, il est vrai, mais suffisante, comment, dans tout changement d'état, il se produit un travail qui absorbe une certaine quantité de la force vive des ondes lumineuses.

Les radiations solaires déterminent, avons-nous dit, de

[1] Cette opinion a été justifiée par l'expérience, car on a reconnu que les milieux de l'œil étaient aussi athermanes que l'eau. (Janssen.)

[2] Fresnel, *Suppl. à la Chimie de Thomson*, p. 136, à la fin.

nombreuses réactions chimiques; nous allons rappeler les faits connus à ce sujet, et ce rapide examen achèvera de rendre parfaitement claires nos idées sur la transformation des ondes lumineuses.

Les plantes, pour se développer, empruntent au monde extérieur de l'acide carbonique, de l'eau et quelques sels minéraux. Dans tous ces composés, la molécule est formée d'atomes peu nombreux, mais enchaînés par des liens étroits. Les rayons du soleil séparent les atomes les uns des autres, et les mettent à même de former de nouvelles combinaisons d'une structure plus complexe, et, par suite, d'une plus grande instabilité. C'est ainsi que se sont formés les tissus ligneux, les résines et toutes les autres substances organiques que nous brûlons dans nos foyers, ou qui, consommées par les animaux, alimentent la combustion physiologique.

Ainsi, à parler rigoureusement, la croissance des végétaux a pour point de départ une décomposition, et la croissance des animaux a pour source immédiate une combinaison. Dans la première de ces merveilleuses opérations, la force vive de la vibration solaire, restant emmagasinée au sein de la matière pesante, représente une puissance mécanique disponible, car si on brûle ces arbres et ces végétaux, ils font naître de la chaleur directement, du pouvoir mécanique indirectement.

Et maintenant que nous avons esquissé le tableau des grandes harmonies de la nature, ne devons-nous pas nous demander s'il n'est point donné à l'esprit de l'homme de comprendre le secret de ces admirables transmutations? Nous avons établi que, contrairement à l'ancienne opinion, la lumière n'était pas une substance combinée avec divers éléments des corps, mais qu'elle était un mode de mouvement de l'éther. Donc, pour expliquer d'une manière plausible son intervention comme agent chimique, il faut nécessairement dire que les atomes d'oxygène et de car-

bone de l'acide carbonique, et d'une façon générale tous les atomes combinés les uns avec les autres, peuvent se séparer à cause de la violence de l'agitation excitée par l'impression des rayons solaires. En effet, la vitesse et l'amplitude des oscillations moléculaires peuvent, dans certaines conditions, augmenter au point de faire sortir les molécules de leurs sphères d'activité réciproques. Alors elles sont mises en liberté, soit d'une façon complète, comme cela arrive pour l'oxygène de l'acide carbonique, décomposé par les plantes soit incomplétement, c'est-à-dire que les atomes, une fois séparés les uns des autres, se groupent de manière à former des molécules plus ou moins complexes, mais d'une stabilité d'autant moindre que la complication moléculaire est plus grande. Voilà comment on peut expliquer les décompositons photogéniques; il est tout aussi facile de rendre compte des combinaisons. En effet, l'agitation incessante inhérente aux dernières particules des corps, augmentant graduellement sous l'action continue de la lumière, il peut arriver que certains atomes pénètrent dans les sphères d'activité des atomes voisins; un agencement spécial s'établit entre ces diverses particules matérielles qui, dès lors, restent enfermées dans une sphère d'activité commune, et, tout en se heurtant réciproquement, oscillent d'une façon synchrone. Or, au moment où ces réunions d'atomes s'effectuent, d'après les principes formulés plus haut, il doit y avoir un dégagement de chaleur et par suite assez fréquemment une explosion, comme nous le voyons lors de la combinaison du chlore avec l'hydrogène [1].

Nous avons usé des mots *sphère d'activité, limites des forces*, donnant à ces expressions la signification que leur accordent la plupart des physiciens; mais nous avouerons que ce sens est loin d'être clair. Néanmoins nous conti-

[1] Relire le passage de Bunsen, cité p. 149.

nuerons à appeler toutes choses par le nom qui leur est habituellement donné, nous réservant de modifier notre langage lorsque nous pourrons expliquer ces forces sans recourir à de mystérieuses entités.

Toujours est-il que présentement, abstraction faite de toute idée préconçue sur la nature des forces, nous voyons comment les réactions chimiques, au moins celles déterminées par la lumière, peuvent être ramenées à de véritables phénomènes de mouvement. Vers la fin de sa vie, Fresnel écrivait : « Si la lumière n'est qu'un certain mode de vibrations d'un fluide universel, comme les phénomènes de la diffraction le démontrent, on ne doit plus supposer que son action chimique sur les corps consiste dans une combinaison de ses molécules avec les leurs, mais dans une action mécanique que les vibrations de ce fluide exercent sur les particules pondérables, et qui les oblige à de nouveaux systèmes d'équilibre plus stables pour l'espèce ou l'énergie des vibrations auxquelles elles sont exposées[1]. »

En présence de cette immense force vive communiquée à notre planète et à l'éther qui l'imprègne, par le soleil, sous forme de radiations calorifique et chimique, on se demandera peut-être si le rayonnement de la terre vers les espaces célestes restitue à ces espaces toute la force qu'elle en a reçue. A ce sujet, le doute est permis, malgré l'opinion contraire des physiciens, et je crois qu'il serait difficile de fournir des preuves valables à l'appui d'une semblable hypothèse. Bien plus, en tenant compte des faits exposés jusqu'ici, il paraît probable que la compensation par rayonnement porte exclusivement sur la partie des radiations solaires qui n'arrivent pas jusqu'à nous, car celle qui parvient au sol est acquise définitivement au globe terrestre sous forme de force vive emmagasinée dans les

[1] Fresnel, *Suppl.* cité, *ibid.*

diverses combinaisons chimiques. On voit donc que la source principale de la force mécanique sur notre globe est le soleil; les rayons solaires, considérés en tant que cause du mouvement sur notre globe, n'interviennent pas seulement comme rayons chauds pour produire des phénomènes de dilatation, mais ils agissent encore par leurs propriétés chimiques et, par suite, physiologiques, car c'est le soleil qui fait croître les plantes, et ces plantes, brûlées dans l'organisme des animaux comme dans le fourneau d'une machine à vapeur, deviennent source de travail mécanique exécuté par le corps de l'animal[1]. Aussi le divin poëte a-t-il pu dire, en toute vérité :

> Guarda il calor del sol che si fa vino
> Giunto all' umor che dalla vite cola[2].
> DANTE, *Purgat.*, XXVI.

Répétons-le encore, pour nous, les végétaux ne sont pas des combinaisons d'une certaine matière lumineuse avec les substances organiques, mais bien de véritables récipients capables de tenir emmagasinée la force vive des rayons du soleil. Si quelqu'un nous demande de quelle manière cela peut s'accomplir, je répondrai qu'il ne nous est pas encore donné de le savoir, et, cependant, le fait en lui-même est certain. Admirons ici l'ordre admirable qui a présidé à la création; cette masse lumineuse et incandescente placée au centre de notre monde planétaire, non-seulement, par la gravitation, entretient le mouvement des astres qui circulent autour d'elle, mais encore,

[1] L'immense provision de force que la nature a concentrée dans le soleil se répand dans tout l'univers par l'intermédiaire de ses rayons. La vie animale et végétale sur la terre, dans l'état actuel, de même que les puissantes manifestations géologiques des premiers âges du monde, n'ont pas eu d'autre origine. (Bunsen, *Mémoire* cité, 1859.)

[2] « Vois la chaleur du soleil qui devient vin réunie à la séve qui coule de la vigne. »

par ses radiations, répand la vie à la surface de chacun d'entre eux.

Ainsi il ne nous est pas possible, jusqu'à présent, de pénétrer le mystère de la régénération de la matière par l'action du soleil, ni de connaître exactement la structure intime des corps. Cependant qu'il nous soit permis de compléter les indications fournies sur ce point dans le chapitre VII par quelques conjectures qui découlent tout naturellement des faits précédents.

L'existence de l'éther étant acceptée, et nous sommes pleinement autorisés à le faire, nous devons, en outre, admettre que les distances des atomes matériels entre eux sont énormes par rapport à leurs dimensions, et que ces grands intervalles sont occupés par l'éther; cependant il ne faut pas tomber dans l'exagération et comparer les distances respectives des atomes de la matière à celles des planètes dans les espaces célestes[1].

Nous supposons, de plus, chaque molécule pondérable animée d'un mouvement de rotation, et sa forme n'étant pas sphérique, il doit se former autour de chacune d'elles une couche dans laquelle l'éther ambiant diminuera de densité, ses atomes étant refoulés excentriquement par la force centrifuge qu'engendre la rotation moléculaire. Donc, aux limites de cet espace se produira une augmentation de pression, à laquelle fera équilibre le milieu environnant.

Lorsqu'un solide tourne au milieu d'un fluide, le plus souvent un certain nombre des molécules du milieu prennent part au mouvement gyratoire. Or le même phénomène peut se produire entre l'éther d'une part et les molécules pondérables de l'autre; par conséquent on peut admettre, autour de ces molécules, de véritables tourbillons éthérés, mais cela n'est pas absolument nécessaire, et même en

[1] Voy. livre I, chap. X

refusant d'admettre ces tourbillons, on doit reconnaître que l'atmosphère éthérée de chaque molécule doit être dilatée par l'effet de la rotation moléculaire. Quoi qu'il en soit, qu'il y ait gyration ou non, pour la simplicité du langage, nous appellerons tourbillon la sphère dilatée qui environne la molécule. Dans le cas du mouvement de ce tourbillon, son axe de rotation sera fixe ou variable de position suivant qu'il en sera ainsi de l'axe de rotation de la molécule centrale. Au sein d'un milieu ainsi constitué, les tourbillons éthérés devront, par effet de force centrifuge, tendre continuellement à s'éloigner, jusqu'à ce que leur développement soit devenu suffisant pour qu'il y ait équilibre entre les effets centrifuges et les pressions extérieures. Mais si les tourbillons sont trop rapprochés, la diminution de pression qui existe près de leurs centres n'étant pas, en cette région, compensée par la force centrifuge, ils pourront se réunir et former un tourbillon unique, dont le mouvement sera la résultante des divers mouvements partiels. Un phénomène de ce genre s'observe quelquefois à la surface de l'eau. Par conséquent, il y aurait des tourbillons simples et d'autres composés. Or, il est fort rationnel d'admettre que les premiers appartiennent aux molécules des corps simples, et les seconds aux molécules des corps composés.

Lors de la rencontre de deux molécules enveloppées de leurs tourbillons, il pourra se faire que, grâce à la vitesse dont elles sont animées, elles ne puissent arriver à se toucher, car la force centrifuge des atmosphères éthérées les a éloignés l'une de l'autre avant que le contact ait pu se produire. Le plus ordinairement, l'effet contraire se produira ; alors il y aura pénétration réciproque des deux tourbillons, si la force qui a projeté les deux molécules l'une contre l'autre n'a pas été assez intense pour les faire rebondir, et ainsi les éloigner suffisamment après le choc, elles resteront réunies, et leurs tourbillons se fusionne-

ront en un seul; si la force de projection est suffisamment énergique, elles se sépareront après le choc, et chacune d'elle restera enveloppée de son tourbillon propre.

Dans les gaz, la vitesse de projection étant énorme, si les atomes se rencontrent, ou bien ils n'arriveront pas même au contact, ou tout au moins, si le contact a lieu, l'effet de ressaut sera assez prononcé pour que les derniers atomes conservent leur indépendance réciproque. Que la force de propulsion vienne à diminuer, les molécules ne pourront rebondir indéfiniment, mais s'arrêteront à une limite telle que la gravité équilibrera leur effort propulsif, et l'on aura un corps liquide. Enfin, si la vitesse de projection s'affaiblit encore, les atomes ne posséderont plus une force suffisante pour que les tourbillons une fois réunis puissent se séparer. Dès lors ils se réuniront les uns aux autres; le plus souvent, les nouveaux groupes ainsi formés auront une orientation commune, et un corps solide prendra naissance. Nous ne disons pas que les diverses molécules réunies de cette manière resteront exactement en contact les unes avec les autres, mais elles se trouveront alors à une moindre distance qu'auparavant, et les tourbillons de chacune d'elles coexisteront comme partie d'un tourbillon général. Ainsi, dans les liquides, il règne un parfait équilibre entre la force centrifuge, la force de projection et la raréfaction des couches contiguës aux atomes. Voilà pourquoi les molécules obéissent presque exclusivement à la gravité, d'où la propriété des liquides de présenter toujours une surface libre de niveau et parfaitement continue.

Rappelons-nous que dans le livre premier nous disions : Lors de la fusion d'un solide il doit se faire deux espèces de travail : 1° un pour désorienter les atomes; 2° un autre pour les dilater. Or, ce double travail ne doit pas seulement s'effectuer sur les atomes, mais encore sur les tourbillons, qui possèdent, eux aussi, une direction

commune. Peut-être à ce sujet nous fera-t-on une objection, on nous dira : D'après votre théorie il ne doit point y avoir de travail absorbé pour la dilatation moléculaire, lors de la fusion d'une de ces substances, qui, de même que la glace, prennent un moindre volume en devenant liquides. Notre réponse sera facile : la contraction observée est seulement apparente, parce que si la dilatation ne se traduit pas sur les grandes masses, elle ne s'en produit pas moins dans leurs plus petites parties. Les molécules cristallisées, en perdant leur orientation, doivent s'éloigner les unes des autres, au moins suivant certaines directions, car dans les solides, les distances intermoléculaires ne sont pas les mêmes dans tous les sens, tandis que le contraire arrive dans les liquides. Or, lorsque les molécules auront pris ces positions régulièrement espacées, pouvons-nous décider si la variation de volume de la masse totale sera positive ou négative? par conséquent ne soyons pas surpris de voir survenir, pendant la fusion d'un solide, tantôt une dilatation, tantôt, au contraire, une contraction. Au reste, même en laissant de côté le travail de dilatation, on expliquerait d'une façon très-satisfaisante comment toute liquéfaction nécessite l'absorption d'une grande force vive, en rappelant qu'à ce moment il doit se faire deux travaux, d'abord une désorientation des molécules, et, de plus, une distribution uniforme de l'éther autour de chacune d'elles.

Dans cette théorie, la cohésion des solides s'expliquerait complétement par la pression que l'éther environnant exerce pour rétablir l'équilibre troublé par la dilatation que développe dans leurs couches centrales la rotation des molécules pondérables. Ainsi on reviendrait à cette opinion de Galilée, que la ténacité des corps est la mesure de la résistance de leurs dernières particules à la formation des vides interstitiels. Bien entendu qu'il faut prendre ici le mot de vides, non pas dans le sens d'espaces privés

d'air, mais d'intervalles dans lesquels l'éther fait défaut.

Actuellement nous pouvons préciser la signification des termes *sphères d'attraction*, *sphères d'activité*; ces mots désignent pour nous les sphères, ou mieux les régions occupées par l'éther dilaté, et cette dilatation se faisant sentir seulement sur une couche d'éther infiniment mince (eu égard à nos unités de mesure linéaires), on conçoit pourquoi les sphères d'activité sont d'un rayon excessivement petit.

C'est chose à peu près certaine qu'il n'y a point parité complète de forme ni de dimensions entre toutes les molécules des corps pesants; et cette diversité de configuration doit exercer une notable influence sur les tourbillons qui se forment autour de chacune des dernières particules de la matière. Par conséquent, rien ne nous empêche d'admettre que tous ces tourbillons ne présentent ni la même vitesse ni la même masse, et ainsi s'expliquerait la variété des propriétés chimiques et physiques spéciales aux diverses substances de la nature.

Pour les atomes de l'éther il en est autrement, et nous pouvons très-vraisemblablement les regarder comme tous de même masse, de même volume, de même forme (ils sont sphériques selon toute probabilité), et animés d'un même mouvement de rotation, en vertu duquel ils ont tous le même degré d'élasticité. Il n'y a donc aucune raison pour qu'un tourbillon se forme autour de tel atome de préférence à tel autre : aussi un milieu exclusivement formé d'atomes éthérés restera homogène, c'est-à-dire uniformément dense.

Ce que nous avons dit des molécules matérielles isolées s'applique d'ailleurs à des molécules groupées de manière à former un corps. Par conséquent, au sein de tout assemblage de masses pesantes se manifestera une raréfaction de l'éther qui s'étendra même à l'éther extérieur, mais en décroissant rapidement d'intensité à mesure que

la distance augmentera, pour devenir bientôt une simple diminution de pression de certaines couches du milieu ambiant. Les belles recherches de Regnault sur le son montrent que, dans le voisinage des corps sonores, l'air est réellement dilaté; elles sont donc favorables à nos idées théoriques sur l'état de l'éther au sein de la matière pesante considérée à l'état de vibration et de rotation.

A l'aide de cette hypothèse, il est facile de s'expliquer les réactions chimiques; on peut, en effet, regarder les combinaisons comme produites simplement par la réunion de deux ou plusieurs tourbillons moléculaires *différents les uns des autres par l'étendue et par la vitesse.* Ainsi l'affinité chimique ne diffère pas, en principe, de l'affinité homogène, c'est-à-dire de la cohésion. Toutes les découvertes de la science moderne viennent à l'appui de cette manière de voir. Ainsi, aprés les expériences de H. Sainte-Claire Deville, peut-on ne pas rapprocher des phénomènes de l'évaporation certaines actions chimiques qui s'accomplissent lentement?

Plus les atmosphères sont inégales, et par leur volume et par leur vitesses, plus il y a de chance pour que l'équilibre soit rompu, et plus l'affinité chimique a d'énergie, car un grand tourbillon absorbera facilement un autre moins étendu, tandis que deux tourbillons égaux pourront rester l'un à côté de l'autre sans se réunir, leurs réactions étant toujours parfaitement équilibrées. Ainsi l'intensité et la rapidité des combinaisons dépendent de la dissemblance des atmosphères moléculaires; si bien que l'on peut expliquer de cette manière l'échelle d'affinité établie par les chimistes. Lors de la fusion des atmosphères inégales appartenant aux atomes qui prennent part à une action chimique, il doit nécessairement se produire un changement dans la quantité d'éther formant chacune d'elles, et alors l'atmosphère de la molécule résultante peut parfaitement ne pas re-

présenter une quantité d'éther égale à la somme de celles qui formaient les atmosphères partielles des atomes combinés. Ces considérations nous serviront plus tard à expliquer comment pendant les combinaisons chimiques se produisent de véritables flux éthérés, des courants, qui engendrent toute une classe de phénomènes nouveaux dont nous aurons à parler.

Jusqu'ici nous avons considéré d'une manière très-générale le problème de l'affinité chimique; appliquons maintenant notre hypothèse au cas particulier des réactions chimiques déterminées par la lumière. Les ondes lumineuses, en rencontrant les corps pesants, leur communiquent une certaine quantité de mouvement, laquelle trouble l'équilibre dynamique des molécules, d'où destruction de certains groupes atomiques et formation de nouveaux tourbillons généraux. En effet, les molécules subissant alors, de la part des ondes lumineuses, une succession de chocs, la quantité de force vive qu'elles renferment augmente nécessairement. Les impulsions considérées chacune en particulier sont, il est vrai, presque insensibles, tant est faible la masse des atomes éthérés; mais elles se répètent pendant longtemps d'une façon rhythmique, et plusieurs billions de fois par seconde; par conséquent, elles parviendront à imprimer des vitesses considérables aux molécules, quand bien même celles-ci auraient une masse relativement assez grande. Dès lors l'agitation intérieure d'un corps, augmentant graduellement, arrivera à un degré tel, que, du tourbillon général d'une molécule, un certain nombre d'atomes s'échapperont et reprendront leur état d'atomes libres enveloppés chacun d'un tourbillon particulier et indépendant. Ainsi la lumière est essentiellement une force décomposante, et toutes les fois qu'elle sépare des éléments unis chimiquement, elle communique une certaine force vive à la matière pesante, car un travail quelconque se réduit

toujours à une communication de mouvement malgré les résistances qui s'opposent à ce mouvement, c'est-à-dire malgré l'inertie des masses.

Quelquefois cependant la lumière détermine les combinaisons chimiques d'une manière indirecte. En effet : 1° plusieurs corps étant en présence et soumis à son action, elle peut mettre en liberté leurs atomes constitutifs et les placer dès lors dans les conditions favorables pour contracter de nouvelles combinaisons. Un effet de ce genre peut même se comprendre entre les corps regardés jusqu'ici comme élémentaires, car qui saurait affirmer si réellement ces substances sont simples, et, à l'appui de notre dire, nous citerons la combinaison directe du chlore avec l'hydrogène, puisque selon toute probabilité, le chlore est un corps composé? 2° Si cette explication ne paraît pas satisfaisante, nous dirons que la lumière peut encore déterminer la réunion d'atomes différents en augmentant la force vive des uns et des autres, à tel point que ces atomes venant à s'entre-choquer, leurs tourbillons éthérés se pénètrent pour ne plus se séparer. Cette réunion peut être favorisée par l'agitation communiquée à la masse par les vibrations lumineuses; car tous les jours nous voyons, lorsqu'une certaine force vive est communiquée à un milieu en repos, ce milieu devenir capable de produire des effets qui n'auraient pu être obtenus s'il n'eût reçu un mouvement préalable. On sait, par exemple, que le choc de deux navires est beaucoup plus dangereux pendant une grosse mer que pendant une mer calme.

Il ne nous est pas possible de savoir au juste comment les choses s'accomplissent dans tous les cas particuliers, car les atomes et leurs mouvements échappent complétement à nos sens; mais on ne peut se refuser à reconnaître combien nos hypothèses sont rationnelles. Ajoutons même que nous observons dans les mouvements vibratoires des

corps pesants des phénomènes soit d'adhérence, soit de disjonction, qui rappellent complétement ceux dont nous admettons l'existence entre les molécules de l'éther. Ne voyons-nous pas un corps léger, un petit morceau de papier suspendu dans l'air à l'aide d'un fil, être attiré par une cloche en vibration et rester adhérent à sa surface, et, pour opposer un exemple au précédent, nous rappellerons qu'un verre se brise par l'effet des vibrations exagérées que l'on excite en lui lorsqu'on tire un son très-intense d'un corps voisin susceptible de résonner à l'unisson.

Nous nous réservons de discuter ces hypothèses dans tous leurs détails; cependant il est nécessaire de répondre ici à deux difficultés qui se présentent tout naturellement.

1° Comment les mouvements rotatoires et gyratoires de l'éther peuvent-ils se conserver toujours avec la même intensité, le fluide éthéré étant doué d'inertie?

On comprendrait, à la rigueur, ce résultat dans un espace complétement libre, mais il paraît impossible dans un milieu inerte et résistant, car un atome en mouvement dans un pareil milieu doit perdre peu à peu sa force vive en la communiquant aux atomes environnants.

L'objection est spécieuse, et elle reproduit celle que Newton opposait à la théorie interstellaire de l'éther, disant que le fluide devrait retarder la marche des astres, car atomes et planètes obéissent aux mêmes lois. En restreignant la question, pour le moment, au cas des particules pesantes, nous dirons que cette argumentation repose sur un principe faux, car elle suppose que le mouvement dans une masse limitée se conserve indéfiniment, chose impossible. Considérons, en effet, une portion isolée de l'éther, abstraction faite de l'ensemble, alors elle seule communique du mouvement à la masse entière, donc sa force vive s'épuisera rapidement. Mais en réalité les choses se passent autrement, car si certains atomes cèdent une partie de leur vitesse aux atomes du milieu universel, réciproque-

ment ceux-ci lui restituent une quantité de force vive correspondante, et ces compensations s'établissent sous mille formes différentes. Pour citer un seul exemple, ne voyons-nous pas le carbone en brûlant restituer au système général de l'univers la force vive que, malgré un éloignement de 90 millions de lieues, le soleil lui avait communiquée alors que, dans les parties vertes des plantes, il le précipitait de l'acide carbonique?

Par l'expérience nous arrivons à reconnaître que jamais la force ne se perd, donc la quantité de force vive répandue dans l'univers reste constante; mais il n'en est plus de même si l'on considère les masses limitées.

Examinons donc comment les tourbillons peuvent se conserver autour de chaque molécule. Nous ne dissimulons pas les difficultés réelles que l'on éprouve à traiter cette question à l'aide des principes connus de la mécanique; néanmoins, si l'application laisse à désirer, le fait n'en existe pas moins. En effet, nous voyons des mouvements de gyration se propager à de très-grandes distances au sein des masses liquides, et dans l'air les trombes marines, les tourbillons de poussière parcourir un trajet de plusieurs lieues sans se rompre[1]. Ces météores se forment et se propagent très-probablement suivant les lois du mouvement ondulatoire, c'est-à-dire qu'il n'y a pas transport d'une même masse d'air en rotation, mais transmission graduelle d'un mouvement gyratoire à travers les couches successives d'une portion déterminée de l'atmosphère, et, par suite, leur théorie repose tout entière sur le jeu des forces propres aux fluides, c'est-à-dire la gravité

[1] Procédant un jour sur la voie Appienne à la mesure d'une base, je vis s'élever du côté de la mer un tourbillon de poussière vertical très-mince, de 2 mètres de diamètre environ; il traversa la route en un point voisin de notre station, il alla se perdre dans les montagnes à une distance de 6 kilomètres au moins. L'air était parfaitement calme, et nous ne remarquâmes aucun courant contraire pouvant expliquer la formation de ce tourbillon.

et l'élasticité. S'il n'en était pas ainsi, on ne pourrait comprendre comment une trombe marine peut, pendant un trajet de plusieurs lieues, lancer des torrents de pluie, alors qu'une seule décharge suffirait pour débarrasser la masse d'air tournoyante de toute l'eau qu'elle pouvait contenir à l'état de vapeur. Donc il se produit ici quelque chose d'analogue à la propagation des ondes; seulement dans ce dernier cas, le déplacement des molécules est limité à une oscillation autour de la position d'équilibre, tandis que dans les tourbillons il y a de plus un certain mouvement de *translation* dont la vitesse est une composante de celle du tourbillon lui-même [1].

De cette manière, on peut rendre compte des divers phénomènes observés dans la propagation des tourbillons, d'une façon beaucoup plus complète qu'on n'a pu le faire jusqu'à présent, soit en supposant un transport d'une masse d'air animée d'un mouvement gyratoire, soit en regardant les trombes comme engendrées par le conflit de deux courants opposés.

Dans un milieu élastique (quelle que soit du reste la cause de cette élasticité), une onde, une fois formée, continue à se propager sans nouvelle action de la cause déterminante, mais à mesure qu'elle s'éloigne des centres d'ébranlement, ce qu'elle gagne en étendue elle le perd en vitesse. A notre avis, il en est exactement de même des mouvements de gyration. En effet, l'éther est élastique [2], et grâce à cette propriété il peut transmettre les ondes de toutes espèces; par conséquent, il en sera autant pour les tourbillons moléculaires. Ces tourbillons prennent

[1] Dans l'onde isolée, le mouvement des molécules est réellement un mouvement gyratoire à axe horizontal.

[2] On dit souvent que les trombes sont transportées par le vent, mais il est évident, d'après notre manière de voir, qu'elles peuvent se propager d'une autre façon, et en effet, dans les mers australes, les cyclones marchent dans une direction contraire à celle des courants atmosphériques inférieurs.

naissance sous l'influence d'une impulsion étrangère, et, une fois formés, pour se maintenir en mouvement ils n'ont nul besoin de recevoir incessamment une nouvelle force vive de la molécule matérielle, qui leur sert simplement d'axe de rotation et leur permet de suivre la ligne de translation de la molécule elle-même.

2° Voici maintenant la seconde difficulté; elle est plus sérieuse. Il résulte de notre hypothèse que la densité de l'éther serait moindre dans l'intérieur des corps pesants que dans le vide. Conséquence diamétralement opposée aux idées généralement admises. On pourrait dire, à la vérité, que tous les mathématiciens ne sont point d'accord sur ce dernier point. Ainsi M. Lamé est arrivé par l'analyse à des conclusions semblables aux nôtres: pour lui, l'éther serait moins dense dans les corps les plus réfringents[1], et la matière exercerait sur l'éther une action répulsive qui, en définitive, pourrait bien n'être pas autre chose que la force de projection et la force centrifuge développées par les rotations moléculaires. Cauchy avait admis cette action répulsive de la matière sur l'éther. Briot admet dans l'éther une force répulsive; en outre, il croit à une attraction exercée par la matière pesante sur l'éther; du reste, il ne se prononce pas sur la question de densité[2]. Mais nous ne devons pas nous borner à mentionner les autorités scientifiques favorables à notre théorie, il nous faut interroger les faits.

Examinons comment les physiciens ont été conduits à admettre, pour l'éther contenu dans l'intérieur des corps, une densité moyenne plus grande que celle du même

[1] Lamé, *Journal de l'École polytechnique*, t. XIV, cahier 23, p. 269. « Ainsi, la densité moyenne de l'éther dans les corps diaphanes est moindre que celle du même fluide dans le vide, et l'action que la matière pondérable exerce sur l'éther est répulsive. » (*Mémoire sur les lois d'équilibre du fluide éthéré*, § VI.)

[2] Briot, *Comptes rendus*, t. LVII, p. 868.

fluide dans le vide; nous trouvons deux raisons principales : 1° ils avaient supposé l'existence d'une certaine attraction ou condensation de l'éther autour des molécules matérielles; condensation dont on n'a fourni aucune preuve concluante jusqu'à présent. Au contraire, d'après plusieurs mathématiciens dont nous avons rappelé plus haut les travaux analytiques, il se produit dans ces conditions une véritable répulsion; 2° en admettant l'éther plus dense dans l'intérieur des corps, on explique très-facilement la diminution de vitesse éprouvée par la lumière lors de son passage à travers les milieux réfringents, car cette vitesse étant représentée par la racine carrée du rapport de l'élasticité e à la densité $V=\sqrt{\frac{e}{d}}$, si d augmente, V diminue. Mais ce raisonnement est peu concluant, car évidemment V peut diminuer, si e diminue alors même que d reste constant, ou bien encore si les deux termes du rapport varient à la fois, pourvu que e diminue plus rapidement que d, ce qui revient à admettre que la loi de Mariotte ne s'applique pas à l'éther contenu dans les corps. Ces réflexions ne doivent surprendre personne, Nos objections méritent d'être prises en considération, car : 1° nous savons que la formule $V=\sqrt{\frac{e}{d}}$ n'est pas suffisante pour expliquer toutes les circonstances de la propagation du son; il faut encore tenir compte de la chaleur dégagée dans l'air par le développement des ondes. L'étude de la double réfraction a conduit les physiciens à attribuer les variations éprouvées par la vitesse de propagation de la lumière à l'influence de l'élasticité du milieu plutôt qu'à celle de la densité. Herschel[1] disait avec beaucoup de justesse : « Le seul moyen que nous ayons de mesurer l'élasticité d'un milieu est la connaissance de

[1] *Traité de la lumière*, t. II, p. 182.

la vitesse des rayons lumineux dans ce milieu; si donc on ne veut pas se condamner à tourner dans un cercle vicieux, il faut s'adresser à des phénomènes d'un autre ordre pour savoir quelle est la vraie manière d'interpréter la formule précédente. » 2° Dans la théorie de la double réfraction, on admet que les lignes de moindre élasticité pour l'éther sont celles de plus grande compression pour la matière pesante. Tels sont les axes de cristallisation, de compression. « On doit regarder l'élasticité de l'éther dans le verre comprimé comme étant minimun suivant la direction de la force comprimante, et maximum dans la direction perpendiculaire [1]. Dans ces circonstances, on pourrait admettre un changement de densité, mais on préfère imaginer une variation survenue dans l'élasticité de l'éther. Or, les mêmes suppositions sont permises dans le cas de substances ayant une densité uniforme et présentant la simple réfraction; par conséquent, en disant que dans l'intérieur des corps la densité et l'élasticité de l'éther diminuent en même temps, mais la première plus rapidement que la seconde, nous présentons une hypothèse commode et parfaitement rationnelle. Notre proposition sera encore plus claire si nous ajoutons que, pour nous, le mot élasticité n'est pas seulement, suivant la définition d'Huyghens, la propriété que possèdent les atomes de l'éther de revenir constamment à leur forme primitive, mais nous prenons ce mot dans son acception la plus étendue; c'est-à-dire qu'il nous sert à représenter l'ensemble des forces qui agissent sur la masse fluide pour la ramener à son état d'équilibre aussitôt que, par une cause quelconque, cet état vient à être troublé, ces forces pouvant agir à l'intérieur ou à l'extérieur des molécules. En un mot, nous adoptons la définition suivante, donnée par Lamé [2].

[1] *Traité de la lumière*, t. II, p. 206, n° 1089.

[2] *Théorie math.* Paris, 1852, p. 1.

« Lorsque les molécules de la matière constituent soit un corps, ou un milieu limité ou indéfini, les causes qui ont assigné à ces molécules leurs positions relatives sont en quelque sorte persistantes ou agissent continuellement, car si quelque effort intérieur change un peu et momentanément ces positions, les mêmes causes tendent à ramener les molécules à leurs places primitives : c'est cette tendance, cette action constante que l'on désigne sous le nom d'élasticité. »

Ainsi compris, le mot élasticité ne doit pas être exclusivement réservé à rendre compte des effets de l'attraction et de la répulsion moléculaire, mais on peut l'employer pour expliquer des phénomènes à la production desquels les forces moléculaires ne prennent qu'une part très-secondaire; par exemple, les ondes qui se forment à la surface d'une eau tranquille sous l'influence de la pesanteur.

Donc l'éther dans l'intérieur des corps pesants et celui qui occupe les espaces libres de matière pondérable, étant soumis à des influences très-différentes, il est clair que les deux termes du coefficient $\frac{e}{d}$ doivent varier en même temps, et il n'est pas rationnel de supposer que l'une ou l'autre de ces deux quantités puisse rester invariable.

Nous examinerons encore les raisons qui conduisirent Fresnel à supposer une augmentation de la densité de l'éther dans les corps réfringents; il avait reconnu que les formules établies dans cette hypothèse rendaient exactement compte des faits relatifs à l'intensité de la lumière polarisée par une substance diaphane en éprouvant soit une réflexion, soit une réfraction. Mais Mac Cullagh et Neuman ont montré depuis que l'on arrive aux mêmes formules en attribuant à l'éther une densité uniforme, si l'on suppose le mode de propagation des rayons polarisés différent de celui imaginé par Fresnel; enfin Cauchy, sans faire aucune hypothèse particulière sur la densité relative

du milieu, mais en admettant simplement une différence des vitesses, est arrivé, par l'analyse, à des formules générales complètes, renfermant celles de Fresnel comme cas particulier, et il a signalé de nouveaux phénomènes qui, inaperçus par ce grand physicien, ont été plus tard complétement vérifiés par l'observation directe[1]. Ainsi les formules de Fresnel ne doivent plus être citées comme un argument favorable à telle ou telle théorie.

Quelques physiciens, Euler entre autres, ont pensé que la lumière pouvait se propager dans les corps par l'intermédiaire de la matière pesante elle-même; mais si l'on réfléchit à la prodigieuse vitesse des rayons lumineux, laquelle vaut plusieurs millions de fois celle du son, on reconnaîtra que jamais la matière pesante ne pourrait présenter une élasticité assez parfaite pour permettre une telle rapidité de transmission.

Avec le secours de l'analyse, Lamé croit avoir démontré l'impossibilité de cette hypothèse, et ses conclusions sont que, dans l'intérieur d'un corps, on doit admettre non-seulement la matière pesante, mais encore une autre espèce de matière, véritable milieu, vibrant sous l'influence de la lumière, tandis que la matière pesante ne prend qu'une part purement passive au phénomène en modifiant, par une sorte de résistance, la direction des vibrations et les vitesses de propagation dans les diverses directions[2]. Suivant ce mathématicien, les molécules pondérables flotteraient pour ainsi dire dans l'éther et partageraient tous les mouvements dont il est agité, de même que nous voyons les corps légers nageant à la surface de l'eau, monter et descendre alors qu'ils sont rencontrés par une onde développée dans la masse liquide. Briot arrive à conclure que les molécules pondérables ne

[1] Cauchy, *Exercices d'analyse et de physique mathém.*, t. I. Voy. *Comptes rendus*, t. LXII, p. 868.

[2] Lamé, *op. cit.*, p. 327, n° 129 et 130.

doivent pas rester immobiles pendant le passage de l'onde lumineuse; elles sont entraînées dans le mouvement, et, par suite, l'onde éprouve un certain retard qui serait la cause principale de la dispersion.

Enfin les expériences de Fizeau sur la transmission de la lumière par les corps en mouvement, réfutent complétement la théorie de la propagation de la lumière par la matière elle-même. En effet, si les choses se passaient ainsi, lorsque la lumière traverse un corps en mouvement, sa vitesse devrait être augmentée ou diminuée de toute la vitesse propre aux molécules pesantes. Or, l'expérience ne justifie pas cette déduction théorique, et elle montre qu'une fraction seulement de la vitesse du corps pesant se compose avec celle de l'onde lumineuse. Cette fraction est représentée par le coefficient, nommé, en optique, *puissance réfractive* d'une substance, et elle dépend de la différence entre les vitesses de la lumière dans le vide et dans le milieu. Fizeau, mesurant la variation de vitesse de la lumière à l'aide d'un réfracteur interférentiel particulier, a trouvé que si la lumière traversait deux colonnes d'eau animées d'une vitesse de 7 mètres par seconde, on obtenait un déplacement d'un quart de frange environ, nombre qui satisfait aux relations indiquées précédemment. Ainsi, les corps traversent l'éther comme un filet traverserait l'air, c'est-à-dire en transportant une certaine quantité de fluide, le reste passant à travers les mailles; dès lors la portion entraînée pourra influer sur la vitesse de la lumière de même que le vent fait varier la vitesse du son.

Le phénomène de la dispersion montre clairement que l'éther n'est pas distribué uniformément dans l'intérieur des corps pesants. En effet, d'après la loi de la propagation du mouvement vibratoire dans un milieu homogène, les ondes longues et courtes doivent se transmettre avec la même vitesse, et le fait a été vérifié (au moins dans certaines limites d'intensité) pour le son dans l'air et pour la

lumière dans les espaces interstellaires. Or, le contraire arrive dans les corps réfringents, et les ondes les plus courtes éprouvent le ralentissement le plus considérable; d'où la dispersion chromatique. Ce phénomène a été pendant longtemps une objection sérieuse au système des ondulations, mais Cauchy l'a complétement expliqué en admettant comme principe la non-homogénéité de l'éther contenu dans les corps pesants. Briot et Lamé, de leur côté, sont arrivés à une semblable conclusion, car, d'après leurs calculs, dans le cas d'un milieu constitué à la façon des corps pesants, c'est-à-dire de particules centrales enveloppées d'atmosphères ayant une densité non uniforme, les coefficients des équations différentielles qui expriment la vitesse de l'onde ne sont plus constants, mais variables avec la longueur de l'onde elle-même; d'où il résulte deux espèces de retard, un constant et un autre variant en raison inverse du carré de la longueur de l'onde, et c'est ce dernier qui produit la dispersion [1].

Si petite que l'on suppose l'oscillation moléculaire, on voit parfaitement, sans recourir aux raisonnements analytiques, qu'elle n'est point négligeable par rapport à la longueur de l'onde et au rayon de la sphère éthérée à densité variable, qui enveloppe chaque particule pesante, et dont le rayon, selon toutes probabilités, est excessivement petit. Donc, au sein des corps, les atomes éthérés oscillent réellement dans un milieu hétérogène; en outre, l'influence de cette non-homogénéité se fera sentir sur les ondes d'autant plus qu'elles auront une moindre longueur, car elles traverseront alors un plus grand nombre de couches différentes.

A l'appui de notre explication, nous rappellerons un fait déjà cité plus haut : la théorie et l'expérience ont montré que la vitesse des ondes développées dans un fluide pesant,

[1] Briot, *Comptes rendus*, loc. cit.

l'eau, par exemple, est modifiée par la présence du fond; ces ondes sont d'autant plus ralenties que l'épaisseur de la couche liquide est moindre. Or, qui nous dit que la présence des molécules pesantes dans l'intérieur des corps n'agit pas sur les mouvements lumineux comme le fait l'élévation progresive du fond de l'Océan sur les vagues de la surface?

Les questions traitées dans ce paragraphe établissent une liaison étroite entre les manifestations des radiations lumineuses et la constitution moléculaire des corps; la théorie mécanique de la chaleur se trouve ainsi complétée, puisque les forces chimiques, de même que le calorique, se réduisent à des modes de mouvement. Aux personnes qui jugeraient nos hypothèses un peu trop hardies, nous répondrons que nous sommes prêts à les abandonner si on nous en fournit de meilleures; nous les prions, cependant, d'attendre pour se prononcer que nous ayons passé en revue les autres branches de la physique. Pour le moment, nous appelons l'attention du lecteur sur un point de vue nouveau et fort intéressant. Dans le mouvement ondulatoire, deux cas sont à considérer : celui où l'onde est régulière et celui où l'onde est rompue, parce que l'impusion excède les limites de l'élasticité. Les phénomènes qui se manifestent alors constituent une branche spéciale de la physique, branche qui sera étudiée dans le livre suivant.

Pour le moment, il nous reste encore à examiner toute une classe de phénomènes optiques très-curieux; cette étude sera utile pour dissiper toutes les obscurités que pourrait encore présenter la théorie de la lumière.

CHAPITRE VII

DE QUELQUES PROPRIÉTÉS DU MOUVEMENT ONDULATOIRE DE L'ÉTHER DANS LES MILIEUX HOMOGÈNES. — POLARISATION DE LA LUMIÈRE.

Autant il est facile d'établir d'une manière générale que la lumière est un mouvement ondulatoire particulier de l'éther, autant on éprouve de sérieuses difficultés lorsqu'on cherche à déterminer la nature de ce mouvement et des modifications qu'il peut éprouver. Ces difficultés tiennent à deux causes principales. La première est la connaissance très-imparfaite que nous possédons des mouvements ondulatoires, même de ceux propres aux fluides pondérables; fort heureusement nous avons chaque jour sous les yeux des mouvements de ce genre, et nous pouvons en observer les particularités, car les résultats fournis par le calcul ne sauraient nous en donner une idée. La seconde cause est notre complète ignorance de la constitution physique de l'éther et des forces qui le régissent; aussi nous est-il impossible de déduire des propriétés du fluide la nature du mouvement dont il est susceptible. Au contraire, nous sommes obligés de discuter avec soin toutes les modifications des mouvements qui nous permettent d'acquérir par voie d'induction quelques notions sur la nature de l'éther. Nous ne pouvons pas, et, du reste, nous n'essayons pas d'aborder ces difficultés; elles ne se rapportent qu'indirectement à notre sujet, mais nous voulons examiner certains faits se rattachant immédiatement à la constitution de la matière, et qui nous seront utiles dans la suite.

On considère habituellement en mécanique deux genres de mouvements oscillatoires des milieux fluides continus: les premiers déterminent des variations de densité dans

la masse et procèdent par vibrations longitudinales parallèles à la direction des rayons; nous citerons comme exemple les vibrations sonores dans l'air et dans l'eau; les seconds se produisent sans variation de densité du milieu, et les vibrations sont alors transversales et perpendiculaires à la direction des rayons, exemple les ondes qui se développent à la surface d'une eau tranquille sous l'influence de la pesanteur. Donc un même fluide peut propager les deux systèmes de mouvement suivant les forces mises en jeu.

En recherchant auquel de ces deux genres de pulsations se rattachent les ondes lumineuses, on a trouvé qu'elles devaient être considérées comme des vibrations transversales, et on a été conduit à ce résultat par l'étude du phénomène appelé par Newton *polarisation* de la lumière, parce que, pour l'expliquer, il supposait aux rayons lumineux des pôles et des côtés.

Les premiers phénomènes de polarisation furent observés par Huyghens sur les rayons réfractés émergeant d'un spath d'Islande; plus tard, Malus reconnut que la réflexion et la réfraction simples peuvent aussi polariser la lumière. Nous allons résumer ici les faits principaux. Si un rayon solaire naturel, c'est-à-dire ayant parcouru un milieu homogène sans rencontrer d'obstacles, pénètre dans une chambre obscure et traverse un cristal de spath, il se divisera en deux rayons qui, à la simple vue, paraîtront parfaitement égaux; mais en les dirigeant sur un miroir non étamé, faisant avec leur direction un angle de 36°, on reconnaîtra que le plus souvent ils sont inégalement réfléchis; si alors on imprime au miroir un mouvement de rotation autour du rayon, en ayant soin de ne pas faire varier l'angle d'incidence, on constate que, pour une certaine position du miroir, un seul des rayons éprouve la réflexion; l'autre est *éteint*. Puis, lorsqu'on continue le mouvement du miroir, il arrive bientôt dans une position telle, que le rayon

qui, tout à l'heure, s'éteignait, est maintenant le seul à subir la réflexion, l'autre devenant irréflexible. Ces deux positions diffèrent de 90°. On peut répéter une expérience analogue, mais en dirigeant le rayon dédoublé par le spath à travers un milieu réfringent; on observe alors des variations d'intensité complémentaire de celles observées dans le cas de la réflexion. Ainsi, les deux rayons isolés par le spath étant réfléchis ou réfractés, présentent dans leur intensité une série de maximums et de minimums qui se répètent pour chaque cadran, décrit par la surface réfléchissante où le corps réfringent et les maximums et les minimums correspondent toujours à des positions distantes de 180°.

Si on fait passer un des deux rayons bifurqués par le spath à travers un nouveau rhomboèdre de carbonate de chaux, généralement il se partagera en deux autres d'inégale intensité, et en faisant tourner le deuxième cristal, à chaque quart de circonférence, on verra les deux nouveaux rayons présenter alternativement un maximum d'éclat, puis une extinction complète. Dans l'intervalle d'un maximun à un minimum, les deux rayons présentent une égale intensité lorsque le second cristal a tourné d'un demi-quart de révolution. Dans le cas où les deux rayons sortis du premier cristal traverseraient en même temps un second spath, on observerait pour chacun d'eux les phases décrites plus haut, mais le nombre des rayons émergents serait doublé; de sorte que dans certaines positions on en aurait quatre et deux seulement dans d'autres.

Ces propriétés ne sont pas spéciales à la lumière transmise par un cristal, mais on les constate aussi sur les rayons réfléchis par un miroir de verre non étamé, sous un angle de 36°, et, en général, sur une lame transparente quelconque, inclinée de façon à ce que le rayon réfléchi soit perpendiculaire au rayon réfracté; on obtient aussi

une polarisation plus ou moins complète en faisant passer un rayon, sous une inclinaison déterminée, à travers une pile de lames de verres [1].



Fig. 15.

[1] On constate facilement tous ces faits à l'aide de l'appareil de Norremberg (fig. 15). — *p*, glace étamée horizontale; *n*, glace non étamée mobile autour d'un axe horizontal. L'angle formé par cette ligne avec la verticale est mesuré sur le cadran *c*; *e*, diaphragme placé dans un anneau gradué sur la circonférence ; *m*, glace de verre noir, convenablement inclinée et fixée au disque *o*, qui peut tourner dans un limbe gradué *i*.

La figure montre comment on obtient un rayon polarisé par réflexion sur la glace *n*. La glace faisant avec la verticale un angle de 36°, on dirige sur cette lame de verre un rayon lumineux faisant 36° avec sa surface ; ce rayon est renvoyé en *p* ; en ce point, il se réfléchit de bas en haut, traverse la glace *n*, et rencontre le miroir *m* incliné de 36° sur la verticale. Si on fait mouvoir horizontalement le disque *o*, on trouve facilement les deux positions où la glace *m* ne réfléchit pas le rayon *nz*.

La seconde partie de la figure 15 représente comment on modifie l'appareil pour examiner le passage d'un rayon de cristal à travers deux spaths : le premier est placé dans un tube en *e* et le second en *g*. (*Note du traducteur*.)

Tous ces faits peuvent être rapprochés les uns des autres, et montrent que les rayons ainsi modifiés diffèrent des rayons naturels, en ce qu'ils ne présentent plus de tous côtés les mêmes propriétés; c'est pourquoi on les a dits *polarisés*. Dans le système des ondes, on a expliqué la différence entre les deux genres de faisceaux, en disant que les vibrations des molécules d'éther se font perpendiculairement à la direction des rayons, et que dans les rayons polarisés tous les mouvements moléculaires sont orientés dans une certaine direction et suivent une série de lignes parallèles, tandis que dans les rayons naturels ils sont dirigés dans tous les sens comme les rayons d'une roue [1]. On peut encore faire comprendre cette différence en empruntant une comparaison à l'acoustique. Nous voyons, en effet, les verges vibrantes décrire tantôt une ligne droite, tantôt une ellipse ou un cercle, ou toute autre courbe; de même les atomes de l'éther, dans les rayons polarisés, oscillent suivant des droites parallèles, et dans les rayons naturels suivant des courbes de toute espèce et des lignes droites croisées dans tous les sens. Il a même été possible de reconnaître, par des procédés délicats, les cas dans lesquels les oscillations étaient elliptiques ou circulaires. Nous reviendrons plus tard sur ce point.

Les phénomènes de la polarisation montrent d'une façon évidente que les vibrations lumineuses doivent être transversales. En effet, si elles étaient longitudinales, la direction d'un miroir, par rapport à l'axe d'un faisceau incident, n'exercerait aucune influence sur la réflexion des rayons, l'angle d'incidence demeurant constant; mais si les vibrations sont transversales, il en sera autrement, car dans une certaine position la surface réfléchissante sera

[1] Le rayon polarisé serait à peu près représenté par cette figure ≡ ou par celle-ci ||||, tandis que le rayon naturel devrait être figuré ainsi ✳.

parallèle aux oscillations lumineuses, et alors celles-ci, rebondissant à sa surface avec la plus grande facilité, ne pénétreront pas dans le milieu transparent, tandis que le contraire arrivera si la surface du miroir est perpendiculaire à celle des oscillations; car, remontant le milieu normalement, elles pénétreront à l'intérieur.

Fresnel, appliquant aux molécules lumineuses les principes établis en mécaniques concernant la composition des mouvements, a pu rendre compte de toutes les particularités observées dans la transmission et dans la réflexion de la lumière polarisée. Plus tard, Cauchy, reprenant la question, est arrivé, comme nous l'avons déjà dit, à des formules plus générales comprenant celles de Fresnel, et qui, de plus, ont permis d'expliquer les faits observés par d'autres physiciens.

Les propriétés des vibrations transversales exigent que si deux rayons polarisés se rencontrent à angle droit, il ne peut y avoir destruction des mouvemets ondulatoires, mais alors les molécules prennent un mouvement orbitaire. Ainsi, lorsque deux rayons polarisés ayant des directions rectangulaires se superposent, on n'observe aucun phénomène d'interférence, bien que dans leur marche ils présentent une différence d'une demi-longueur d'onde, et cependant ils sont ainsi dans les conditions voulues pour interférer. Ce phénomène nous fournit un moyen pour distinguer les rayons naturels de ceux qui présentent des mouvements suivant des orbites elliptiques ou circulaires.

Nous nous arrêtons donc aux conclusions suivantes : 1° les ondes lumineuses sont transmises par l'éther sans variation dans la densité de ce milieu ; 2° les ondes de la lumière naturelle sont transversales dans les rayons non polarisés ou naturels. Nous ne saurions fournir, il est vrai, aucune preuve directe à l'appui de la dernière proposition, mais nous l'admettons par induction. En effet,

si la nature d'un milieu et si les forces qui en sollicitent les atomes sont telles qu'un rayon propagé par ce milieu, après avoir été réfléchi ou réfracté, présente nécessairement un mouvement d'un certain genre, après la réflexion ou la réfraction, cette espèce de vibration doit être toujours la même avant ces modifications étrangères.

Cauchy, cherchant à établir la nature des forces qui devaient être en action dans le milieu éthéré pour produire des ondes transversales, a reconnu que deux hypothèses sont admissibles : 1° donner aux molécules une puissance attractive variant en raison inverse du carré des distances; ou 2° supposer les molécules animées d'une force répulsive réciproquement proportionnelle (au moins dans le cas de molécules peu éloignées du contact) à la quatrième puissance des distances, et même à des puissances plus élevées. Or, dans cette seconde hypothèse il ne se produirait pas de dispersion appréciable des couleurs; aussi peut-on l'appliquer au cas de l'éther libre[1]. Ces résultats sont fondés sur une analyse peut-être un peu approximative; par conséquent, nous ne voulons pas leur accorder une trop grande importance.

Les vibrations transversales étant admises, essayons d'expliquer le mécanisme de leur formation en nous appuyant simplement sur les propriétés du milieu dans lequel elles se développent, sans recourir aux calculs élevés de la théorie mathématique. Selon Fresnel la vibration des molécules pesantes produirait, comme effet immédiat, une onde longitudinale ; mais celle-ci diviendrait promptement transversale à cause de la résistance de l'éther, attendu que ce fluide, par sa constitution, transmet exclusivement (toujours selon Fresnel) les ondes transversales. Cette ma-

[1] Cauchy, *Exercices d'analyse et de physique math.*, t. 1, p. 289. Briot a trouvé le rapport selon la 6e puissance, comme nous l'avons dit plus haut.

nière de voir est juste, mais les explications fournies à l'appui ne sont pas toutes d'une grande clarté à notre avis. Ainsi on compare souvent les ondes transversales de l'éther à celles du même genre qui se forment dans l'eau, dans les verges solides et les lames métalliques; mais dans ces cas le sens du mouvement ondulatoire s'explique facilement, car il s'accomplit dans la direction de la moindre résistance du liquide ou du solide. Il en est tout autrement pour l'éther fluide homogène, dont la résistance est partout la même.

En réfléchissant sur cette difficulté, il nous est venu à l'esprit une idée que nous exposerons brièvement, car, peut-être convenablement développée, elle fournira des données utiles pour la solution du problème.

Jusqu'à présent, toutes les théories proposées en dehors de l'analyse mathématique pour expliquer la propagation des mouvements vibratoires dans les milieux élastiques, l'éther par exemple, ont eu pour base les idées d'Huyghens; en d'autres termes, on a toujours regardé les molécules d'éther comme des sphères élastiques complétement immobiles, et nous ne savons pas qu'on ait songé à rechercher quelles seraient les lois de la propagation de ces mêmes mouvements si l'on supposait les molécules animées de rotation, qu'elles soient, du reste, élastiques ou non, dans le sens propre du mot. Or, comme rien n'empêche d'étendre à un milieu formé par de telles molécules les propriétés observées dans les cas ordinaires des corps en rotation, il est possible d'expliquer comment les vibrations transversales se développent dans l'éther.

La mécanique nous enseigne que si un corps en rotation reçoit un choc suivant le plan de la section principale perpendiculaire à l'axe du mouvement, il se développe un nouvel axe spontané de rotation, et en général le centre de gravité du corps est transporté dans une direction plus ou moins inclinée sur la ligne de percussion. La chose

se vérifie aisément en choquant une toupie qui tourne; elle s'échappe sur le côté. On connaît à ce sujet l'expérience de Marianini; on met une toupie sur un plan horizontal, et, pendant qu'elle *dort*, on incline le plan du sud au nord, la toupie se meut aussitôt de l'est à l'ouest; si l'on incline le plan de l'est à l'ouest, elle se meut du sud au nord.

Ainsi la composante de la gravité fait marcher la toupie dans un sens normal à cette composante même. Le phénomène n'a lieu, bien entendu, que si la toupie tourne.

Mais la direction du choc peut être oblique sur la section principale normale à l'axe de rotation; elle peut même devenir parallèle à ce plan. Alors, outre le déplacement latéral du centre de gravité, il se produira une déviation de l'axe de rotation suivant une loi bien connue dans la théorie des corps tournants, et dont l'énoncé peut se résumer ainsi : « L'axe de rotation devient perpendiculaire au plan passant par sa position initiale et la direction du choc [1]. »

Il résulte de ces principes que si les atomes de l'éther sont en rotation :

1° Lorsqu'ils viendront à s'entre-choquer, non-seulement ils pourront prendre des directions latérales par rapport à celles du choc, mais cette direction sera nécessaire, et il peut arriver que, pour une vitesse de rotation déterminée, les mouvements longitudinaux deviennent presque complétement impossibles.

2° Dans le mouvement des atomes éthérés, il faut tenir compte du déplacement de leurs axes, qui, se disposant

[1] On explique de même : 1° les phénomènes observés à l'aide du giroscope; 2° comment, en vertu de l'attraction exercée par le soleil et la lune sur la protubérance équatoriale de la terre, l'axe terrestre, au lieu de s'incliner dans le plan de l'écliptique, est dévié de la direction perpendiculaire et décrit un cône autour de cette ligne; une révolution complète de l'axe s'accomplit en 25,000 ans; si notre planète était sans rotation, cette durée serait réduite à 14 ans.

toujours perpendiculairement à la direction de l'impulsion, contribuent puissamment à la propagation de l'ébranlement dans le sens transversal.

Jusqu'ici on avait négligé complétement cette particularité du mouvement qui anime les molécules de l'éther, et, cependant, peut-être pourrait-elle fournir une théorie assez simple des phénomènes de la polarisation; elle me paraît, en effet, concorder avec cette hypothèse de Fresnel, que les oscillations ou vibrations lumineuses sont parallèles au plan de polarisation.

En effet, supposons des atomes éthérés en rotation rencontrant dans la direction de leur équateur une surface réfléchissante inclinée; leurs axes seront déviés les uns vers la droite, les autres vers la gauche du plan de réflexion. De même ces atomes, en pénétrant à l'intérieur d'une substance réfringente, seront heurtés à droite et à gauche; par conséquent, leurs axes s'inclineront dans le plan de réfraction. Donc, lors de la réflexion, les axes moléculaires oscilleront suivant un plan; pendant la réfraction ils oscilleront suivant un autre perpendiculaire au premier, et ces deux plans seront perpendiculaires au plan de polarisation. De telle sorte que la vibration lumineuse consisterait en de simples oscillations des axes des atomes éthérés autour de leur centre de gravité sans translation absolue, et par là sans condensation du milieu. Ces quelques explications montrent comment nous comprenons les mouvements transversaux de l'éther; disons toutefois que nous ne sommes point opposé à l'hypothèse du mouvement de translation des atomes éthérés. Mais il nous paraît que dans la nouvelle hypothèse toutes les difficultés disparaîtraient, et nous la recommandons à l'attention des mathématiciens. Pour le moment, notre intention n'est pas de renverser les idées reçues; notre remarque a seulement pour but de montrer que, contrairement à l'opinion de certaines personnes, on ne rencontre

aucune difficulté sérieuse à admettre les mouvements transversaux de l'éther.

Ainsi la rotation des atomes de l'éther, qui déjà nous avait suffi pour faire comprendre comment ils peuvent présenter toutes les propriétés des corps élastiques, nous permet encore d'expliquer la direction des vibrations transversales de la lumière. Du reste, quelle que soit l'hypothèse adoptée comme base de la théorie des ondes transversales, leur existence démontre à elle seule, avec la dernière évidence, que l'éther est formé d'atomes isolés auxquels on peut appliquer les principes de la composition et de la décomposition des forces fournis par la statique. Aussi, géomètres et physiciens sont-ils d'accord sur ce point, et nous avons vu Cauchy essayer de déterminer par le calcul la distance maximum de deux molécules. Mossotti, après avoir exposé les recherches de Fresnel, dit : « L'existence des vibrations transversales entraîne nécessairement l'hypothèse d'un éther formé par des atomes isolés[1]. » Donc, supposer l'éther continu, à l'exemple de quelques physiciens, est chose inadmissible.

Un rayon de lumière polarisé devient un des moyens les plus délicats pour étudier la structure intime des corps, et, suivant l'heureuse expression d'un célèbre écrivain, on peut le comparer à un voyageur qui, ayant parcouru des contrées inconnues, revient au milieu de nous, riche de connaissances dont il nous fait tous profiter. Grâce à la lumière polarisée, on a pu reconnaître : 1° que les solides les plus homogènes en apparence possèdent cependant une grande inégalité de structure; 2° que, contrairement aux conclusions de la mécanique, les liquides sont d'une constitution assez compliquée; 3° elle nous a appris quelle était l'action du magnétisme sur les corps transparents; enfin la lumière polarisée, sortant du laboratoire des physiciens

[1] Mossotti, *Physiq. mathém.*, vol. II, leç. XXVIII, p. 324, note.

pour entrer dans le domaine de l'industrie, a permis de reconnaître les falsifications de plusieurs substances très-employées[1]. Mais nous laisserons de côté toutes ces questions, malgré tout l'intérêt qu s'y rattache, et nous dirons seulement quelques mots de la structure des métaux.

CHAPITRE VIII

DE L'OPACITÉ DES CORPS ET SPÉCIALEMENT DE L'ACTION DES MÉTAUX SUR LA LUMIÈRE

L'opacité et la transparence ne sont pas des propriétés absolues de la matière; nulle substance n'est parfaitement transparente, et le corps le plus opaque, pris sous une très-faible épaisseur, devient translucide[2]. Ainsi, constamment un certain nombre de rayons sont absorbés par les corps et se transforment, avons-nous dit, en produisant une action chimique ou thermique. Nous pouvons reconnaître plusieurs causes à cette absorption : 1° le frottement de l'onde éthérée passant entre des molécules de forme plus ou moins anguleuse; 2° le travail nécessaire pour constituer les molécules du corps dans un nouvel état d'équilibre, travail accompli aux dépens de la force vive de l'éther; 3° la facilité plus ou moins grande des molécules à vibrer à l'unisson de l'onde incidente. Dans le cas où l'unisson est impossible, par la superposition de mouvements ondulatoires de grandeurs différentes, le corps pesant devient souvent le centre d'un nouveau système d'ondes plus longues que les ondes incidentes[3]. Dans ce

[1] Tout le monde connaît l'application du polarimètre à l'analyse des sucres.

[2] Plusieurs métaux fondus (le cuivre par exemple) sont transparents.

[3] Il est bon de rappeler ici une expérience due à Tartini. Lorsque

paragraphe, nous étudierons l'absorption par les métaux.

Depuis longtemps on a donné comme caractère spécifique des métaux *l'éclat métallique* et une grande opacité; ces deux propriétés ne dépendent pas d'une irrégularité de structure, comme on le voit pour certaines substances, car elles se retrouvent tout entières dans les métaux parfaitement purs et cristallisés. Plus récemment, après la découverte de la polarisation, on a reconnu que toutes les substances diaphanes présentées à la lumière naturelle sous une incidence convenable la polarisent à peu près complétement; avec les métaux, au contraire, on n'obtient jamais qu'un angle de polarisation maximum, car ils polarisent constamment la lumière d'une façon très-incomplète. Ces faits conduisirent les physiciens à admettre dans les métaux une très-grande force réfringente, car on savait que l'angle de polarisation augmente avec ce pouvoir, et on citait le diamant, dont le pouvoir réfringent est considérable et qui polarise très-mal la lumière. La conclusion était prématurée; on peut, en effet, rapprocher l'éclat métallique du brillant phénomène qui nous est offert par un prisme dans l'intérieur duquel un faisceau lumineux subit la *réflexion totale;* et cette considération a donné la clef de la véritable explication de l'action des métaux sur la lumière.

Fresnel, par une intuition que l'on peut appeler effort de génie, a trouvé que dans la réflexion totale la lumière subit une telle modification lorsque le rayon polarisé tombe sous une certaine obliquité et sous un certain azimut sur la face intérieur du prisme; les deux composantes, dans lesquelles se peut résoudre le mouvement ne sont

deux cordes dont les sons fondamentaux correspondent à des nombres premiers entre eux, mettent en vibration une troisième corde, celle-ci donne le son fondamental qui lui appartient, quand même ce dernier serait plus grave que les deux autres : chose facile à comprendre si l'on réfléchit à l'incommensusabilité des mouvements excitateurs.

plus d'accord, mais l'une a subi un retard et elles ont une différence de phase. Ce retard dérive sans doute de l'influence du changement de densité à la surface, limite qui se fait sentir à une petite distance. De là il arrive que le rayon reçoit une polarisation elleptique.

Cette différence de phase qui a lieu dans l'intérieur d'un prisme se produit aussi sur une surface métallique, et l'on peut même la rendre très-sensible en faisant subir au rayon plusieurs réflexions successives.

La polarisation elliptique exigeant, pour se manifester, une différence de phase dans les deux composantes principales du rayon réfléchi, il en résulte que toutes deux pénètrent dans l'intérieur de la substance réfléchissante, mais l'une plus avant que l'autre; d'où résulte pour celle-là un léger retard, par suite une discordance constante entre les phases de ces deux composantes[1]. L'expérience a confirmé ces aperçus théoriques; en effet, les rayons émis par les métaux incandescents sous une grande obliquité sont polarisés par réfraction, et, de plus, les métaux, à la température ordinaire, étant réduits en feuilles assez minces pour se laisser traverser par la lumière, polarisent les rayons avec une telle puissance, que suivant Faraday une feuille d'or est un polarisateur préférable à une pile de glaces; et tout récemment M. Hempel a reconnu, à l'aide de l'appareil de Norremberg, qu'une très-mince couche d'argent, obtenue par précipitation chimique, polarise circulairement la lumière par réflexion ou par réfraction avec une intensité surprenante. Ces expériences montrent encore la dissemblance des deux composantes principales, car il y a rotation du plan de polari-

[1] Pour avoir une ondulation elliptique, il faut : 1° que les deux systèmes d'ondes soient rectangulaires, et 2° que la différence de phase soit comprise entre 0 et $\frac{1}{4}$ d'onde. Pour la valeur $\frac{1}{4}$, l'ellipse devient un cercle; pour les valeurs supérieures, le mouvement elliptique change de sens.

sation du rayon émergent d'une mince feuille d'or, et cette rotation varie avec la nature du métal[1].

Dans sa théorie générale de la lumière polarisée, Cauchy a établi avec une exactitude admirable la relation entre les phénomènes dus à la réflexion et ceux dus à la réfraction; s'appuyant sur les lois du mouvement vibratoire, il calcula, dans l'hypothèse de la réflexion d'un rayon polarisé sur une surface donnée, la différence de phases des deux composantes principales du rayon polarisé après la réflexion, et il trouva une valeur variable avec la nature de la substance, mais qui ne devenait jamais rigoureusement nulle. De plus, la différence de phase augmente avec l'incidence d'une demi-longueur d'onde à une longueur tout entière, depuis l'incidence normale jusqu'à l'incidence rasante; mais ce n'est que dans le voisinage de l'angle de polarisation maximum (angle brewstérien) que les variations sont sensibles, et entre deux limites d'autant plus rapprochées, que la lumière est polarisée en plus grande quantité sous l'angle de polarisation maximum; en dehors de ces limites, la polarisation est *rectiligne*, quoique incomplète; en dedans elle est elliptique. Ces limites se confondent si la polarisation peut être complète sous un certain angle, alors il n'y a plus de polarisation elliptique, et la différence de phases passe brusquement d'une demi-longueur à une longueur d'onde sous l'angle de polarisation. Avec les métaux, les variations dans la différence de phase sont sensibles depuis l'incidence normale jusqu'à l'incidence rasante. Aussi le rayon réfléchi possède-t-il toujours la polarisation elliptique. Les nombreuses comparaisons faites par M. Jamin entre les résultats de l'expé-

[1] Faraday, *Philos. trans.*, 1857, part. I, p. 148. La rotation du plan de polarisation est un phénomène assez complexe et qui suppose la composition de plusieurs mouvements, ordinairement de deux mouvements hélicoïdaux, l'un dextrorsum, et l'autre sinistrorsum, avec une différence de phase de $\frac{1}{4}$ d'onde. Voyez les traités spéciaux.

rience et ceux fournis par les formules montrent que celles-ci représentent les phénomènes avec une exactitude remarquable. Ce physicien a reconnu en outre que la connaissance de l'angle de polarisation maximum ne suffisait pas pour calculer la vitesse de la lumière dans les métaux, et, par suite, leur indice de réfraction; de cette manière, on trouvait en effet des valeurs énormes et véritablement exagérées. Ainsi, l'angle de polarisation maximum étant pour l'or 15°, l'indice de ce métal serait 3,79, et pour d'autres métaux les nombres seraient encore plus considérables, de telle sorte que, contrairement aux résultats fournis par les corps transparents, la réfrangibilité augmenterait avec la longueur de l'onde[1]. Mais la théorie nous apprend que l'angle en question est une fonction de deux quantités : une variant avec la vitesse de la lumière, c'est l'indice de réfraction proprement dit; l'autre, dépendant de la résistance offerte par le milieu au passage de la lumière et produisant l'extinction du rayon, a été nommée par Cauchy *coefficient d'extinction;* on doit attribuer à cette dernière action le retard éprouvé par l'une des composantes principales du rayon polarisé, retard qui détermine la polarisation elliptiqué. L'opacité des métaux est donc en rapport très-étroit avec leur pouvoir réflecteur, et nous devons regarder les substances métalliques comme une classe de corps dans lesquels les vibrations transversales pénètrent seulement à une faible profondeur[2].

Ces observations, très-importantes pour nous, établissent nettement la différence entre les milieux transparents et les métaux : les premiers arrêtent les ondes longitudinales, et les seconds les ondes transversales; il devient donc utile de comparer entre elles les principales propriétés de ces substances pour arriver à comprendre com-

[1] Voy. Billet, *Optique*, t. II, p. 145.
[2] Voy. Cauchy, et aussi Billet, t. II, p. 159.

ment les ondes transmises par les unes ne le sont pas par les autres.

Disons tout d'abord que la différence dont nous parlons ne dépend nullement de la nature chimique des corps, mais de la structure moléculaire; en effet, le charbon, à l'état de graphite et à l'état amorphe, agit de même que les métaux, tandis que, cristallisé, il se range à côté des corps transparents. Nous avons mentionné, il est vrai, que le diamant polarisait imparfaitement la lumière, mais cette particularité dépend de la très-grande intensité de son pouvoir réflecteur. Les mêmes résultats ont été obtenus avec le bore, qui, lui aussi, se présente sous deux formes : l'état graphitoïde et l'état adamantin.

Les expériences de Faraday nous mettent sur la voie de la vérité[1]. Chacun sait que l'or en feuilles très-minces, vu par transmission, présente une belle couleur verte; l'or chimiquement pur offre la même couleur, mais tirant un peu plus vers le bleu. D'après le physicien anglais, les feuilles ordinaires ont une épaisseur égale au $\frac{1}{5}$ ou au $\frac{1}{6}$ de la longueur d'onde des rayons jaunes. En faisant flotter une de ces feuilles sur une dissolution aqueuse de cyanure de potassium, on peut réduire son épaisseur à n'être plus que de $\frac{1}{50}$ de cette même longueur d'onde. Dans ces conditions, la couleur verte de la lumière transmise persiste à se manifester dans tous les points où le microscope n'indique aucune solution de continuité; ainsi, cette coloration spéciale est due à une véritable absorption. On arrive à la même conclusion en remarquant que ces feuilles, plongées dans le sulfure de carbone pour annihiler l'effet du verre sur lequel elles doivent être appliquées, polarisent la lumière plus énergiquement qu'une lame de verre placée dans l'air. Suivant Faraday, la compression des molécules métalliques exerce une grande influence sur le pouvoir

[1] Faraday, mémoire cité.

absorbant des métaux. En effet, si on chauffe avec précaution une feuille d'or adhérente à une lame de verre, elle devient transparente, mais la plus légère pression exercée sur sa surface, soit avec le brunissoir, soit même avec l'ongle, suffit pour faire réapparaître la teinte verte.

Cette propriété n'appartient pas exclusivement à l'or; on la retrouve également dans l'argent. Les feuilles minces de ce métal laissent passer une lumière violacée ou pourpre; si on en place un certain nombre dans un tube et si on les chauffe assez fortement, elles prennent une transparence que l'on n'aurait jamais crue appartenir à une substance métallique[1]. Comprimées de nouveau, les lames reprennent l'éclat métallique primitif et présentent une teinte pourpre lorsqu'on le regarde par transmission; de plus, il est difficile de distinguer la flamme d'une bougie à travers une ou deux de ces feuilles, tandis que, lorsqu'elles sont chaudes, quarante ne suffisent pas pour arrêter la lumière. Des phénomènes analogues ont été observés avec les autres métaux réduits en vapeur dans une atmosphère d'hydrogène à l'aide de décharges électriques et précipitées sur des lames de verre. Le platine et le palladium agissent exactement comme l'or; ils polarisent la lumière et font tourner le plan de polarisation dans le même sens; de même pour l'étain, le plomb, l'aluminium, l'argent, le rhodium, etc., les sulfures d'antimoine, de mercure, de cuivre, etc. On a aussi reconnu que ces couches ou voiles métalliques, pour être visibles, devaient présenter une certaine épaisseur.

Les récentes expériences de M. Quinke ont complété les travaux de Faraday; il a obtenu par voie chimique des précipités d'argent extrêmement divisé, n'ayant subi aucune compression, et il a vu la lumière se propager au

[1] Nous avons dit plus haut que le fer chauffé au rouge est translucide; nous-mêmes nous avons reconnu qu'un jet de cuivre en fusion est parfaitement transparent.

sein de ces précipités avec une plus grande vitesse que dans le vide; à la moindre compression éprouvée par le précipité, on observait un ralentissement dans la transmission de la lumière[1].

De toutes ces expériences, nous devons tirer les deux conclusions suivantes : 1° la lumière pénètre dans les métaux jusqu'à une certaine profondeur, mais elle s'éteint rapidement, si bien que la théorie de Cauchy se trouve confirmée; 2° les actions mécaniques, telles que la compression, la percussion et l'état de la surface exercent une grande influence sur le pouvoir d'extinction. L'absorption de la lumière par les métaux ne doit pas être entièrement attribuée aux actions mécaniques que le métal a subies pendant sa fabrication, car il s'observe également dans les précipités métalliques; mais il faut se rappeler que la lumière, en se réfléchissant à la surface d'un métal, éprouve des modifications différentes, suivant le mode de préparation de ce métal.

On se demandera peut-être pourquoi la pression exerce une aussi grande influence sur les propriétés optiques des métaux.

A notre avis, cela résulterait de l'élasticité très-imparfaite de ces corps. Leur limite d'élasticité est facilement dépassée, et alors les molécules ne pouvant revenir à leur position d'équilibre aussi rapidement que l'exige la transmission d'une onde lumineuse, celle-ci s'éteint peu à peu. Dans leur action sur la lumière, les métaux se comportent de même qu'ils le font lorsqu'ils sont soumis à de puissants efforts mécaniques; ils présentent alors une certaine mobilité de leurs molécules, ils deviennent ductiles, compressibles; on peut les contourner de mille façons, leur donner des figures diverses. M. Tresca a montré que, sous de fortes pressions, les métaux solides coulent comme des liquides et présentent même le phénomène de la contrac-

[1] Moigno, *Mondes*, 1er octobre 1863.

tion de la veine. Les expériences ont porté non-seulement sur des métaux mous comme le plomb, mais sur le cuivre, le fer, etc. La déformation du métal sera permanente aussitôt que l'on aura dépassé la limite d'élasticité, les molécules ne pouvant plus revenir à leur position primitive. Dans une mince feuille de métal chauffée, les molécules présentent la plus parfaite élasticité dont elles sont susceptibles; mais si cette même plaque est comprimée, la mobilité moléculaire diminue et certains modes de vibration deviennent impossibles; si enfin on dépasse la limite d'élasticité, les molécules ne peuvent plus reprendre exactement leurs positions d'équilibre; alors un certain nombre de vibrations communiquées à la matière s'éteindront peu à peu, et le métal agira comme un milieu coloré. Supposons que le tassement des molécules augmente encore, tous les mouvements vibratoires sont arrêtés, mais la force vive de ces vibrations ne peut s'anéantir, elle devra donc se manifester sous une nouvelle forme dynamique, par exemple sous forme d'un courant électrique. Les métaux, surtout à l'état de pureté, se rangent à côté des corps mous; l'expérience la plus ordinaire ne nous apprend-elle pas en effet que, pour présenter une véritable dureté, ils doivent être soumis à des procédés spéciaux de fabrication ou bien encore combinés à quelque substance étrangère? de cette façon, on modifie leur cohésion. Les recherches d'acoustique ont confirmé l'opinion présente; car, dans les métaux (le fer et l'acier exceptés), le son se propage moins vite que dans le verre[1]. Nous sommes donc conduits à dire que les métaux jouissent d'une élasticité très-imparfaite, comparable à celle du liége et des corps souples, mais mous (paille, coton, etc.). Ces substances manifestent une élasticité incomplète sous l'influence de pressions un

[1] Voy. Daguin, t. I, p. 615. — Le fer du commerce n'est jamais pur, et l'acier est un corps composé.

peu énergiques ; mais elles étouffent rapidement les vibrations de toute nature à cause de la lenteur avec laquelle leurs molécules reprennent leur position d'équilibre.

Les expériences de Sénarmont sur la conductibilité calorifique des cristaux viennent à l'appui de notre thèse[1].

[1] Voici comment M. de Sénarmont (*Annales de ph. et chim.*, IIIe série, t. XXI, p. 657) étudie la conductibilité des cristaux. Supposons. par exemple, deux plaques de quartz taillées l'une parallèlement et

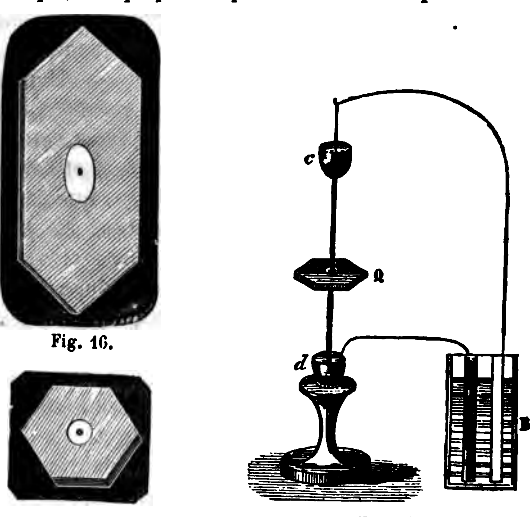


Fig. 16.

Fig. 17.

Fig. 18.

l'autre perpendiculairement à l'axe, recouvertes d'une mince couche de cire. Les plaques sont percées au centre, et dans le trou on introduit un fil que l'on fait rougir en le mettant en communication avec les deux pôles d'une pile B, à l'aide du mercure des coupes *c* et *d*. Le corps gras fond tout autour du point où la chaleur est appliquée et forme à la limite de la fusion un bourrelet liquide qui correspond à une *ligne isotherme*. Quand la plaque est refroidie, le bourrelet est encore distinct, et on peut prendre la mesure des divers diamètres de la courbe qu'il dessine. Les courbes obtenues avec le cristal de roche rendent manifeste l'inégalité du pouvoir conducteur dans les différentes directions. (*Note du traducteur.*)

)'après ce physicien, les seuls exemples d'ellipsoïdes thermiques aplatis se trouvent dans les cristaux négatifs tourmaline, spath d'Islande, et surtout dans ceux qui ibsorbent le rayon ordinaire; réciproquement, les ellipsoïdes allongés appartiennent aux cristaux positifs (quartz, glace), et principalement à ceux qui absorbent le rayon extraordinaire.

Ainsi, le mouvement absorbé correspond toujours à l'axe le moindre élasticité. Donc, une diminution d'élasticité peut rendre un corps transparent incapable de propager les ondes lans une direction donnée.

Ces courbes thermiques circulaires, dans les corps homogènes, deviennent des ellipses lorsqu'on exerce une pression latérale sur ces substances, et le petit axe des ellipses est dirigé dans le sens de la compression. Pour es liquides, ils transmettent les pressions avec la même ntensité dans tous les sens; aussi la propagation des mouvements vibratoires se fait-elle avec une égale facilité dans les divers points de leur masse; de plus, on peut les oumettre aux actions physiques les plus variées, pourvu que leur composition chimique ne change pas; ils conserveront une *intensité spécifique de réfraction*[1] constante. En un mot, aucun d'entre eux ne présente de propriétés omparables à celles des métaux.

Quelques liquides cependant font tourner le plan de polarisation de la lumière, mais c'est là une action propre à la molécule et non à la masse fluide; aussi se retrouve-t-elle dans la substance prise à l'état de vapeur; du reste, il est remarquable que les liquides actifs sont tous d'origine organique.

Notre conclusion finale sera donc celle-ci : tout changement survenu dans la densité ou dans l'agrégation moléculaire d'un corps modifie en même temps la facilité avec

[1] Moigno, *Mondes*, science pure, 23 novembre 1863, p. 680.

laquelle les mouvements vibratoires sont transmis par sa masse dans les différentes directions; et il peut arriver dans certains cas que l'élasticité (ce terme étant employé dans son acception la plus générale; voy. plus haut, p. 249) devienne insuffisante pour permettre la propagation du mouvement, d'où l'opacité complète ou partielle de certaines substances.

Il est nécessaire ici de mettre en parallèle les propriétés des corps diaphanes et celles des métaux, car cette comparaison fera saillir en pleine lumière leur complète discordance.

1° Tous les corps métalliques sont conducteurs de l'électricité et du calorique; les corps transparents, au contraire, sont idiolectriques, isolants et très-mauvais conducteurs de la chaleur.

2° Dans les corps métalliques, les molécules peuvent être dérangées de leur situation d'équilibre, et même dans des limites assez étendues; de plus, elles demeurent d'une façon permanente dans les nouvelles positions qu'on leur a fait occuper; il y a quelques exceptions, l'acier, par exemple; mais alors interviennent des influences étrangères. Dans les corps transparents, au contraire, les déplacements moléculaires sont seulement possibles dans des limites excessivement restreintes, et si on parvient à maintenir les molécules dans un état forcé, au moindre effort le corps se brise; donc, d'une manière générale, leur élasticité est plus parfaite, bien que moins développée; aussi ne sont-ils ni ductiles ni malléables.

3° Les corps métalliques sont opaques, à moins qu'ils ne soient en lames très-minces; les corps non métalliques sont généralement transparents quand ils sont parfaitement purs. Si quelques-uns de ces derniers sont opaques, cela résulte de ce qu'ils agissent à la façon des métaux sur certains rayons; ainsi, dans les cristaux, cet effet est dû, comme nous l'avons vu, à l'élasticité qui n'est pas égale

dans toutes les directions. Le fer oligiste, la carthamine, présentent l'opacité métallique pour certains rayons et sont parfaitement transparents pour d'autres, preuve évidente que l'absorption de la lumière par un corps ne dépend pas de sa nature chimique, mais de sa structure moléculaire. Ajoutons encore que par réflexion les métaux polarisent la lumière en ellipses assez larges et les corps transparents en ellipses très-étroites.

En résumé, nous voyons que les vibrations transversales peuvent s'éteindre en traversant un milieu parfaitement perméable aux mouvements d'une autre nature, et que ces différences sont dues à la disposition moléculaire. Tel mode d'agrégation des atomes produit une substance diaphane, et tel autre la rend opaque : la première sera isolante, la seconde conductrice.

Deux questions se présentent naturellement ici : 1° en quel genre de mouvement se transforme la vibration lorsqu'elle est absorbée? se transforme-t-elle en chaleur, c'est-à-dire en mouvement de la matière pondérable, ou bien en une autre espèce de vibration? La réponse n'est pas difficile : d'abord il est hors de doute que le mouvement ne s'anéantit pas, l'observation journalière nous le prouve; un métal exposé au soleil ne s'échauffe-t-il pas fortement; par contre, dans les mêmes conditions, la température des corps transparents varie à peine. De plus, dans les métaux, il se produit un autre genre de mouvement intérieur, le mouvement électrique, sur lequel nous insisterons plus tard. 2° Pourquoi les propriétés des métaux sont-elles si opposées à celles appartenant aux corps diaphanes? Sur ce point, les conjectures seules sont possibles. Qu'il nous soit donc permis de soumettre à l'appréciation du lecteur les quelques aperçus suivants. En étudiant les formes cristallines des métaux, on les a trouvées toutes voisines du cube; d'où l'on pourrait conclure que leurs atomes sont très-probablement sphériques, ou peu s'en

faut. D'une manière plus générale, leurs moments d'inertie présentent une égalité parfaite ou très-sensiblement parfaite. Dès lors les molécules, dans l'intérieur des masses métalliques, seront d'une grande mobilité et pourront facilement obéir aux moindres impulsions; par conséquent, en se déplaçant pour occuper de nouvelles positions pendant un temps plus ou moins long, elles absorberont la majeure partie de la force vive communiquée à ces masses. Inversement dans les corps diaphanes (qui, pour la plupart, sont des corps composés), les molécules primitives ayant leurs axes d'inertie assez inégaux, sont moins facilement écartées de leurs positions d'équilibre pendant la transmission d'un mouvement à travers leur substance. Donc, ces mouvements passeront facilement en contournant les molécules[1]. Ainsi voyons-nous les ondes développées à la surface de l'eau s'éteindre au contact des corps mous et flexibles, et si par contre un corps dur se présente, elles le contournent et continuent leur progression.

On peut donc ajouter aux causes d'absorption de la lumière l'imparfaite élasticité des substances métalliques qui empêche la propagation du mouvement dans leur intérieur.

CHAPITRE IX

DE LA PROPAGATION DE LA LUMIÈRE DANS LES MILIEUX SOLIDES AYANT UNE ÉLASTICITÉ NON UNIFORME. DE LA DOUBLE RÉFRACTION

Dans les questions d'optique, la plus grande difficulté du sujet résulte de ce que la nature de l'éther nous étant

[1] On pourrait citer des exceptions, nous le savons. Ainsi, le chlorure de sodium, l'alun, le diamant, ont des axes égaux; mais nous proposons des hypothèses et non des démonstrations; encore faut-il dire que ces corps (le diamant excepté) sont composés, et dès lors il est très-difficile de mettre leurs molécules en vibration sans les décomposer.

inconnue, nous devons déduire ses propriétés de l'étude des phénomènes mêmes dont nous cherchons l'explication. On comprend dès lors pourquoi nous sommes forcés de recourir à de fréquentes hypothèses, puis il nous faut justifier *a posteriori* les principes admis en constatant l'exactitude des conséquences auxquelles ils nous conduisent; cependant, comme un même fait peut recevoir plusieurs explications, il reste toujours une certaine obscurité dans les théories. Ces réflexions sont surtout applicables à l'objet de ce paragraphe, dans lequel nous aurons à tenir compte simultanément de l'action de la matière pondérable et de l'influence des agents impondérables. Nous allons traiter de la double réfraction, et, d'après les physiciens les plus éminents, les deux rayons en lesquels se partage un faisceau lumineux lors de son passage au travers de certains cristaux, ou tout au moins l'un des deux seulement est soumis à l'influence du milieu. Cette action ne doit pas nous étonner, car si la matière pesante ne conduit pas directement l'ondulation lumineuse, comme nous l'avons montré plus haut, il est certain, avons-nous ajouté, que la densité et la structure du milieu traversé par l'onde exerce sur elle une grande influence.

Jusqu'ici, nous avons toujours supposé les milieux de densité uniforme; il nous reste à considérer maintenant ceux dont la densité ne reste pas la même dans les trois dimensions. Mais, avant tout, il faut définir ce que l'on doit entendre par *élasticité* et par *corps homogène :* nous prendrons pour guide l'auteur de la *Théorie mathématique de l'élasticité des corps solides* déjà cité maintes fois.

La définition générale de l'élasticité ayant été donnée ci-dessus (p. 249), nous n'y revenons pas, et il nous suffit de faire comprendre actuellement quels sont les caractères d'un corps homogène. On entend par corps homogène ceux dans lesquels une ligne droite L, de longueur appréciable et de direction déterminée, traverse le même nombre *n*

de systèmes moléculaires, en quelque endroit qu'elle soit placée, quand elle se meut *parallèlement* à elle-même. Le rapport $\frac{L}{n}$ peut d'ailleurs varier avec la direction de la droite L, mais il est constant pour toutes les directions parallèles. La géométrie nous apprend que dans ces corps: 1° on peut toujours trouver trois directions rectangulaires correspondant, la première, à la valeur maximum de l'élasticité; la seconde à sa valeur minimum, et la troisième à sa valeur moyenne; 2° que si, prenant trois axes rectangulaires, dont les longueurs soient proportionnelles à ces valeurs, on construit un ellipsoïde sur ces trois droites; un demi-diamètre du solide obtenu tracé dans une direction quelconque représentera l'intensité de l'élasticité dans cette direction; aussi a-t-on appelé ce solide *ellipsoïde d'élasticité*.

Si l'élasticité n'est pas la même dans toutes les directions, le calcul prouve que tout mouvement ondulatoire, en se propageant dans le milieu, présente les particularités suivantes :

1° Lorsque l'éther est ébranlé par un centre unique, les vibrations sont transversales et peuvent toujours être décomposées en deux mouvements perpendiculaires l'un à l'autre.

2° Ces deux mouvements se propagent avec une vitesse inégale dans les diverses directions, et donnent naissance à deux nappes différentes, dont l'ensemble constitue la surface de l'onde.

3° A chaque système d'ondes élémentaires correspond une surface enveloppante distincte, et de cette façon, pour un seul rayon incident, on a deux rayons émergents.

4° Les deux rayons sont polarisés perpendiculairement l'un à l'autre. Dans les cristaux à un axe, l'ordinaire est polarisé suivant la section principale, et l'extraordinaire normalement à celle-ci.

5° En examinant maintenant les phénomènes sous le rapport du *temps*, on reconnaît qu'un même point du cristal reçoit deux ébranlements à deux époques distinctes : le premier lui est apporté par le mouvement le plus rapide et le second par celui dont la vitesse est moindre; il y a exception seulement pour les points où les deux ondes élémentaires se confondent en une seule.

Toutes ces propositions découlent de la théorie mathématique de l'élasticité; de plus, leur exactitude a été contrôlée par l'expérience. Comme elles sont d'une très-grande importance, nous essayerons de les rendre aussi intelligibles que possible aux personnes peu familiarisées avec l'analyse géométrique. Et d'abord la propagation de la lumière dans les cristaux biréfringents étant un cas particulier de la théorie générale de la transmission des mouvements vibratoires par les milieux à élasticité inégale dans les diverses directions, il est bon de prévenir le lecteur que nous accepterons sans démonstration certaines données du calcul, suivant en cela l'exemple fourni par la mécanique céleste lorsqu'elle emprunte à la géométrie les principes relatifs aux forces qui régissent les astres.

1° Pour nous faire une idée d'un milieu ayant une élasticité variable suivant les trois dimensions, examinons un parallélipipède de bois taillé dans le sens des fibres; ce solide ne présente pas la même élasticité suivant la longueur (sens des fibres) et suivant la largeur. De plus, sur une section droite du solide, l'élasticité est différente dans la direction parallèle et dans la direction perpendiculaire aux couches ligneuses. Donc, un mouvement vibratoire communiqué à cette verge ne pourra se propager dans toutes les directions avec une égale vitesse. Pour déterminer rigoureusement comment les choses se passeront, il est nécessaire de recourir au calcul; toutefois il est permis d'affirmer *a priori* que la vitesse de propaga-

tion, variant suivant les trois axes d'élasticité, sera profondément modifiée dans ces trois directions.

Considérons en particulier le cas des vibrations transversales; elles mettent en jeu les composantes de l'élasticité du milieu suivant deux directions seulement, la troisième composante n'intervient en rien.

Supposons pour fixer les idées les vibrations moléculaires s'accomplissant et se propageant dans un plan horizontal parallèlement aux lignes A═══A', évidemment deux genres d'élasticité concourent à leur production : d'abord l'élasticité suivant AA', ensuite celle de la direction perpendiculaire au plan de la figure. Cette dernière sert à la propagation du mouvement, couche par couche, suivant la longueur de la verge; mais l'élasticité de la direction perpendiculaire à la ligne AA', c'est-à-dire selon le sens vertical, n'exercera aucune influence sur les vibrations transversales, car d'après la définition des corps homogènes, dans tous les plans parallèles au plan d'oscillation considéré, l'élasticité conserve une valeur constante. Les mêmes raisonnements sont applicables aux mouvements verticaux |||| C C' qui mettent à profit l'élasticité dans le sens vertical et la mobilité suivant la longueur. Donc, en général, dans les vibrations transversales, seront utilisées seulement l'élasticité parallèle à l'excursion moléculaire et la mobilité du milieu dans le sens de la propagation du rayon.

Il résulte de ces considérations que, dans les milieux à trois axes d'élasticité inégaux, les ébranlements doivent se propager avec une vitesse différente dans deux plans rectangulaires, si les directions des mouvements font entre elles un angle droit. Alors il peut se présenter deux cas : 1° le rayon se propage suivant un axe d'élasticité, 2° ou il est incliné sur cet axe.

1° Dans le premier cas, le rayon se propageant suivant

un des trois axes, les oscillations sont parallèles aux deux autres : AB et CD, par exemple, dans la figure ci-jointe ; le premier système d'oscillation mettant à profit la mobilité du milieu dans la direction normale au plan de la figure, et parallèlement à AB ; seulement il ne sera troublé en rien par les oscillations du second système, qui se propagent en mettant à profit l'élasticité suivant CD. Les deux genres de mouvements vibratoires coexisteront donc avec des vitesses indépendantes l'une de l'autre, de telle sorte qu'un point *k* placé à une certaine distance du centre *o* recevra deux ébranlements successifs *m* et *n*, l'un par le fait des oscillations suivant A B, et l'autre par le fait de celles suivant CD. Mais dans ce cas la surface tangente aux ondes élémentaires est perpendiculaire à l'axe ; aussi le rayon ne présentera aucun dédoublement apparent si la face d'émergence est parallèle à celle d'incidence. Au contraire, dans le cas où les deux faces font entre elles un certain angle, la différence entre les vitesses deviendra manifeste et le rayon se divisera en deux autres.

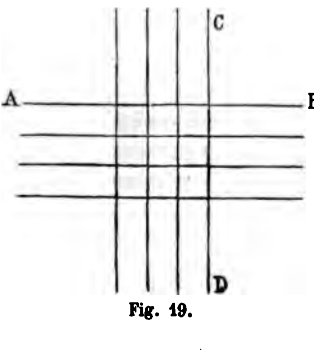


Fig. 19.

m *n*

o *k*

2° Si le rayon est incliné sur les axes, un des deux mouvements suit l'axe de moindre résistance, et l'autre une direction perpendiculaire à cet axe. Ces deux mouvements coexisteront sans s'influencer réciproquement, mais les plans tangents à l'ellipsoïde étant dans ce cas inclinés sur le diamètre suivi par le mouvement dans sa propagation, les surfaces tangentes aux ondes font entre elles un certain

angle et le rayon se dédouble. Il faut excepter cependant le cas d'un mouvement dans une direction perpendiculaire à la section circulaire de l'ellipsoïde, surface dans laquelle l'élasticité transversale étant égale dans tous les sens les rayons lumineux ne subissent aucune bifurcation. Dans cette section se trouvent les axes optiques dont la direction dépend de la longueur de l'onde transmise; or cette longueur est très-variable, voilà pourquoi on observe alors un phénomène comparable à celui de la dispersion.

Plusieurs personnes trouvent difficile à admettre comment un mouvement unique, le mouvement de la lumière naturelle, par exemple, peut donner lieu à des mouvements disposés comme il a été dit plus haut lorsqu'il traverse un cristal[1].

Pour éclairer ce point délicat, nous rappellerons certains phénomènes plus faciles à observer qui nous sont offerts par les corps sonores, formés de solides à trois axes d'élasticité inégaux. En frottant avec un archet une verge à section rectangulaire, on détermine facilement des vibrations dans le sens de la moindre résistance; on réussit, mais avec peine, à obtenir des vibrations suivant une autre direction, avec une verge dont la

[1] Si la lumière consistait exclusivement en mouvements oscillatoires des atomes éthérés autour de leur centre de rotation, les choses s'expliqueraient plus facilement, car on pourrait assimiler les atomes à autant de gyroscopes, tous orientés d'une manière uniforme; or, supposant l'un d'eux heurté suivant son équateur, il prendra un mouvement oscillatoire polaire normal à la direction du choc, et dans son mouvement de balancement, il choquera à son tour les atomes voisins, d'où oscillation polaire de ces derniers dans une direction perpendiculaire à celle du choc, et par suite parallèle à celle de la percussion qui avait troublé les rotations de l'atome considéré en premier lieu. De cette manière, on aurait deux systèmes de mouvements oscillatoires, s'effectuant dans des directions rectangulaires et se propageant chacun avec une vitesse particulière qui serait fonction composée de la résistance du milieu et de la distance réciproque des atomes plus ou moins grande dans les diverses directions.

section droite est un rectangle très-voisin du carré ; on observe alors des lignes nodales spirales assez compliquées. Mais si au lieu d'une simple verge dont les molécules étroitement liées entre elles se prêtent difficilement à la propagation d'un double mouvement, on prend deux verges d'une faible épaisseur, taillées suivant des plans perpendiculaires, complétement distinctes l'une de l'autre et encastrées sur une certaine partie de leur longueur dans une verge mise directement en vibration avec un archet, ces deux tiges vibreront chacune d'une manière indépendante et chacune avec le ton qui lui est propre, de plus, si elles ne sont pas faites de la même matière ; elles propageront le mouvement avec des vitesses différentes. Semblable chose peut arriver pour l'éther lorsqu'une vibration pénètre dans un cristal. L'éther intra-moléculaire n'a pas une densité égale dans tous les sens, mais en sa qualité de fluide mobile, ses atomes peuvent se déplacer indépendamment les uns des autres. Un des mouvements se propagera dans le sens de la moindre résistance, et, par suite, dans le plan nommé section principale ; l'autre sera perpendiculaire au premier. On demandera peut-être pourquoi les directions de ces deux mouvements font constamment un angle droit. Ce fait dépend de cette double considération théorique : 1° qu'un mouvement quelconque est toujours décomposable suivant deux directions perpendiculaires ; 2° que si deux mouvements sont rectangulaires, alors seulement la vitesse de l'un n'est pas influencée par celle de l'autre.

Reste à fixer la direction des rayons : ici il ne faut pas confondre la propagation d'une *onde élémentaire* avec celle de l'onde proprement dite, c'est-à-dire de la surface tangente à toutes les ondes élémentaires : cette dernière seule donne la direction du *rayon lumineux*.

Il était réservé à la géométrie de résoudre cette question, et elle a montré que l'onde était une surface du qua-

trième degré à deux nappes; de plus, ces deux nappes se coupent de manière à donner naissance à des points particuliers nommés *ombilics*, points auxquels la surface présente des dépressions comparables à celle d'un coussin capitonné. On a constaté expérimentalement sur les cristaux l'existence des curieux phénomènes de la réfraction conique dans les points où l'analyse mathématique indiquait la présence de ces ombilics, et ce résultat doit être regardé comme une éclatante confirmation du système des ondulations.

Si la surface d'élasticité est un ellipsoïde de révolution autour d'un de ses axes, la figure de l'onde devient celle d'une sphère ou d'un ellipsoïde de révolution; tel est le cas des cristaux à un axe, le spath d'Islande, la glace, etc. L'ellipsoïde peut être raccourci ou allongé, de là les cristaux positifs ou négatifs. Enfin cet ellipsoïde d'élasticité n'est pas une pure fiction géométrique; son existence est rendue évidente par les courbes thermiques et les lignes nodales observées sur les lamelles cristallines mises en vibration.

La direction du rayon lumineux, dans les corps biréfringents, s'obtient à l'aide de la construction donnée par Huyghens et fondée sur le principe énoncé plus haut. On considère chacun des points de l'onde précédente comme un centre d'ébranlement pour l'onde suivante; seulement dans un milieu uniforme un ébranlement quelconque donnerait toujours une onde sphérique. Au contraire, dans le cas présent, l'onde élémentaire appartiendra à l'une ou à l'autre des deux nappes de la surface de l'onde, puis on trace une surface tangente à toutes ces ondes élémentaires, et une normale à cette surface représente le rayon lumineux. La construction précédente peut et doit être faite pour chacun des points du cristal d'après la définition de l'homogénéité. Dans ces substances, un axe d'élasticité est une direction et non une ligne droite. Donc, en chacun des points du cristal, on peut toujours

concevoir l'ellipsoïde d'élasticité disposé de manière à représenter l'élasticité du milieu, et le même point est aussi le centre de la surface de l'onde.

Ce rapide aperçu est nécessairement un peu obscur vu la difficulté du sujet; il permet cependant de se représenter comment on conçoit les mouvements lumineux dans l'intérieur des milieux à trois axes inégaux sans entrer dans le détail de la théorie mathématique de la double réfraction, théorie très-difficile, mais dont toutes les parties fondamentales sont parfaitement établies; car si quelques points présentent encore un peu d'obscurité, on doit reconnaître qu'ils sont tout à fait secondaires et ne peuvent infirmer en rien la validité des principes.

L'étude que nous venons de faire de la double réfraction avait pour but de montrer que toute la théorie de ces phénomènes repose sur la possibilité de représenter la valeur de l'élasticité dans divers sens par un ellipsoïde dont le rayon vecteur a toujours une longueur proportionnelle au nombre des systèmes moléculaires que rencontrerait par un rayon lumineux suivant la direction de cette ligne. On suppose, bien entendu, le milieu tel qu'une droite donnée rencontre toujours le même nombre de molécules en se déplaçant parallèlement à elle-même, quelle que soit sa direction primitive. Or, on peut admettre comme évident que la matière est distribuée de façon à remplir cette condition dans les solides si leurs molécules présentent une orientation commune, si par exemple les axes de rotation de chacune d'elles sont dirigées dans un même sens. La cause déterminante d'une semblable direction n'est pas difficile à comprendre lorsqu'on se rappelle que dans un solide les molécules sont suspendues au sein d'un fluide, car tous les corps animés de rotation continue tendent, en s'entre-choquant, à prendre des directions parallèles. On pourrait suppo-

ser une pareille orientation dans l'éther, mais cela n'est pas nécessaire, puisque celle des molécules pesantes détermine un régime particulier des atomes éthérés qui à lui seul explique parfaitement pourquoi la lumière se propage avec une inégale vitesse dans les diverses directions. Où la matière pondérable est dense, la vitesse de transmission est minimum, car l'éther est moins libre et moins mobile, son inertie augmentant à mesure que le nombre des atomes matériels suspendus dans ce fluide devient plus grand.

Il reste beaucoup de choses à dire sur la propagation de la lumière dans les corps, mais nous renvoyons aux traités spéciaux. Assurément cette question est ardue, les difficultés sont nombreuses et proviennent principalement de ce que l'analyse n'a pas encore indiqué quels rapports existent entre un grand nombre des faits fournis par l'observation. Mais l'histoire de la science nous montre comment, dans les divers problèmes de la philosophie naturelle, de vastes lacunes se sont comblées peu à peu, et ces exemples nous autorisent à croire qu'il en sera de même pour la théorie dynamique de la lumière. Ajoutons que, dans le système établi en dehors de l'hypothèse éthérée, non-seulement il a été impossible de donner une explication satisfaisante de l'optique supérieure, mais encore toute tentative sérieuse faite de ce côté a échoué. Ainsi l'influence de la matière pondérable sur la densité de l'éther est aujourd'hui un fait acquis à la science, mais la seule action de cette matière ne suffit pas pour expliquer les phénomènes lumineux.

CHAPITRE X

CONCLUSIONS GÉNÉRALES DE CE LIVRE.

Dans cette étude des phénomènes lumineux, notre but a été de rechercher en quoi consiste cette force qui non-seulement, par l'intermédiaire de l'œil, nous met en relation avec le monde extérieur, mais encore vivifie la nature par son influence thermique et la modifie sans cesse par ses propriétés chimiques. Les faits nous ont appris que cette triple action de la lumière se réduisait à des *modes de mouvement d'une certaine substance*, puis pénétrant plus avant dans la question, nous avons reconnu que ce mouvement était une vibration analogue à celle des milieux élastiques. Alors s'est présentée la question de savoir si ces vibrations sont transmises par la matière pesante elle-même; mais cette hypothèse ayant été reconnue inadmissible, nous sommes arrivés à admettre l'existence d'un milieu impondérable répandu dans tout l'univers, imprégnant tous les corps et servant à la transmission des radiations lumineuses calorifiques et chimiques.

Cette vaste théorie présente encore quelques points incomplétement examinés. Ainsi les relations des mouvements de la matière pesante avec ceux de l'éther ont été entrevus bien plutôt que nettement déterminés et encore moins démontrés. Mais, si nous réfléchissons aux difficultés sans nombre dont il a fallu se rendre maître pour résoudre le problème du mouvement des corps célestes, problème très-simple relativement à la question présente, nous reconnaîtrons que c'est chose difficile de trouver par le calcul la loi des phénomènes fournis par l'observation de la nature. La mécanique céleste a ses

perturbations et ses incertitudes, la mécanique moléculaire a aussi les siennes; elles sont même plus nombreuses. Nous citerons, par exemple, les phénomènes de la dispersion chromatique, la position variable des axes optiques dans les cristaux suivant la longueur des ondes et les doutes que l'on peut avoir sur la direction du mouvement des molécules par rapport au rayon [1]. Or, malgré les perturbations constatées dans les mouvements des astres, on a admis la gravité, il est donc permis d'en user de même à l'égard de la théorie de l'éther.

Dans ce livre, à côté de propositions parfaitement démontrées se trouvent de simples conjectures livrées par nous à l'appréciation du lecteur. Au nombre des propositions certaines nous pouvons citer les suivantes : La lumière se propage par la vibration d'un milieu ; ce milieu n'est pas la matière pesante, car dans cette hypothèse, lorsqu'on communique à la matière un mouvement très-rapide, la vitesse de la lumière devrait augmenter ; et il n'en est rien. Cela posé, nous admettons l'éther, fluide matériel impondérable ; de plus, nous proposons quelques conjectures sur la structure intime des corps, à l'aide desquelles toute espèce de force abstraite imaginée

[1] Voyez Lamé, p. 329. D'après Fresnel, les vibrations s'accompliraient à la surface de l'onde suivant des courbes ellipsoïdales et non suivant des courbes sphériques, ce qui revient à dire qu'elles seraient parallèles à la projection du rayon lumineux sur l'onde plane tangente à la surface, et non perpendiculaire au rayon, comme le veut la théorie de Lamé. Dans les deux hypothèses, la forme de l'onde est la même, et les rayons sont polarisés à angle droit ; aussi l'expérience n'est d'aucun secours pour décider entre elles. Cauchy, dont les formules sont plus générales que celles de Lamé, est arrivé à une conclusion conforme à celle de Fresnel. Un autre point est encore incertain : les vibrations, dans les rayons polarisés, sont-elles perpendiculaires ou parallèles au plan de polarisation? Quinke regarde la seconde proposition comme démontrée, mais la plupart des autres physiciens sont d'un avis contraire.

jusqu'ici pour expliquer la cohésion des corps devient inutile.

Ces idées, nous le prévoyons bien, rencontreront une grande opposition parmi les partisans des anciennes théories ; à leur sens, pour expliquer la constitution d'un corps, la matière et le mouvement ne suffisent pas. Désireux d'éviter toute équivoque, nous répéterons encore que nous ne nions pas l'existence des forces ; nous essayons seulement de les expliquer à l'aide des propriétés d'un milieu dont l'existence est irrécusable, et de les ramener à des modes de mouvement. Ainsi, jadis la théorie de certains phénomènes reposait sur l'horreur du vide qui alors était une force, aujourd'hui ces phénomènes sont classés parmi les effets de la pression atmosphérique ; de même, au moyen de l'éther, notre système permet d'expliquer un grand nombre de faits attribués jusqu'ici à des forces mystérieuses.

Nous émettons nos opinions avec toutes les réserves possibles ; il est juste cependant d'ajouter que déjà ces idées théoriques sont acceptées par un grand nombre de physiciens [1].

Nous avons vu que les vibrations sont transversales au rayon et en cela l'expérience est d'accord avec la théorie ; cherchant alors une explication physique de ce fait, nous avons indiqué comment au point de vue mécanique la direction transversale des vibrations pouvait être regardée comme un effet du mouvement rotatoire des atomes. Dans les vibrations transversales, il n'y a pas changement de densité du milieu ; on ne peut cependant se refuser à

[1] Nous citons volontiers les noms d'auteurs, d'abord par justice, et ensuite pour faire voir que bon nombre des explications proposées ne nous sont pas personnelles. Au reste, nous disons avec Galilée (*Saggiatore*) qu'il est très-malheureux de ne pouvoir traiter une question scientifique sans s'appuyer sur les idées des autres, et non sur l'observation de la nature.

admettre la possibilité des vibrations longitudinales; les mathématiciens ont trouvé que ces vibrations existent, mais qu'elles ne se manifestent pas comme radiations. Toujours est-il qu'elles jouent un certain rôle dans l'économie de la nature. Lequel? Jusqu'à présent les conjectures seules sont possibles sur ce point; les uns soutiennent qu'elles produisent le calorique, opinion inadmissible, puisque la chaleur rayonnante se polarise; d'autres leur attribuent les phénomènes de la gravité[1]. Ce sujet sera traité en temps convenable.

De même que la direction transversale des vibrations de l'éther est une conséquence de la rotation dont les atomes sont animés, ainsi la rotation des atomes matériels nous explique pourquoi dans les cristaux biréfringents l'élasticité n'est pas la même dans toutes les directions. En effet, la comparaison des faits nous a conduit à admettre une orientation spéciale des molécules des corps, un parallélisme de leurs axes de rotation duquel résulte une distribution différente de l'éther dans les diverses directions de la masse. La rotation des molécules détermine au sein de l'éther des changements de densité, car ce fluide autour de chacune d'elles est entraîné dans un mouvement de giration et forme des espèces de tourbillons. Selon toutes probabilités, cette inégalité de la densité de l'éther est la cause de la dispersion prismatique et des variations observées dans la position des axes optiques des cristaux biréfringents lorsqu'ils sont traversés par les divers rayons colorés. La direction des axes est profondément modifiée par l'influence de la chaleur[2], preuve évidente que la vibration

[1] Voyez Keller, *Comptes rendus*, 1863. — Challis, *Cosmos*, 4 décembre 1863.

[2] Dans les cristaux de sulfate de chaux, la direction des axes de positive devient négative sous l'influence d'une légère variation de température et change en présentant des couleurs variées.

propre à la molécule pesante, joue un certain rôle dans ces phénomènes. Les mouvements de rotation ne paraissent pas avoir le même degré de stabilité dans tous les corps ; ils sont probablement plus faciles à troubler dans les métaux et les corps simples dont les molécules ont une structure peu compliquée et une forme polyédrique simple. Vu notre complète ignorance relativement à la constitution de l'éther et de la matière pesante, nous devons nous borner à ces quelques observations. Toutefois le fait de l'absorption de la lumière par les métaux nous apprend que l'on doit rapporter à une cause commune, savoir leur élasticité imparfaite, et la propriété dont jouissent ces substances de subir des déformations permanentes sous l'influence des actions mécaniques et celle d'éteindre le mouvement vibratoire et de ne le laisser pénétrer qu'à une faible profondeur.

L'observation est impuissante à nous faire connaître la nature de l'éther ; cependant elle nous montre que ce n'est point un gaz et que ses molécules sont beaucoup plus rapprochées que celles des corps pesants ; en même temps elle met en évidence le rôle important du milieu universel dans la théorie des phénomènes physiques. L'esprit se refuse à regarder l'éther comme un milieu *exclusivement destiné à vibrer*, et, lorsque nous voyons les corps animés de mouvements vibratoires produire les effets les plus variés, il nous est impossible de ne point tenter une explication des forces de la création fondée sur les propriétés de ce milieu. En optique, le système des ondes a fait disparaître les innombrables forces dont la théorie newtonnienne dotait tous les corps; ainsi la théorie complète de l'influence mécanique de l'éther permettra de supprimer de la science un nombre considérable de forces admises jusqu'à ce jour pour expliquer les phénomènes. Bien plus, en voyant les efforts de nombreux et illustres savants, il n'est point témé-

raire d'espérer que la puissante famille des attractions et des répulsions qui à présent règne sur toute la physique (comme les divinités de l'Olympe moderne, dirait M. Émile Martin) ne tardera pas à être détrônée, car nous entrevoyons la possibilité de rattacher à la présence de l'éther les actions moléculaires et chimiques.

« L'existence du fluide éthéré, dit Lamé, est incontestablement démontrée par la propagation de la lumière dans les espaces planétaires; par l'explication si simple, si complète des phénomènes de la diffraction dans la théorie des ondes; et, comme nous l'avons vu, les lois de la double réfraction prouvent avec non moins de certitude que l'éther existe dans tous les milieux diaphanes. Ainsi la matière pondérable n'est pas seule dans l'univers; ses particules nagent en quelque sorte au milieu d'un fluide. Si ce fluide n'est pas la cause unique de tous les faits observables, il doit au moins les modifier, les propager, compliquer leurs lois. Il n'est donc plus possible d'arriver à une explication rationnelle et complète des phénomènes de la nature physique sans faire intervenir cet agent dont la présence est inévitable. On n'en saurait douter, cette intervention, sagement conduite, trouvera le secret ou la véritable cause des effets qu'on attribue au calorique, à l'électricité, au magnétisme, à l'attraction universelle, à la cohésion, aux affinités chimiques; car tous ces êtres mystérieux et incompréhensibles ne sont au fond que des hypothèses de coordination, utiles sans doute à notre ignorance actuelle, mais que les progrès de la véritable science finiront par détrôner[1]. »

Nous ne pouvons rien ajouter à ces remarquables con-

[1] Lamé, conclusion finale de l'ouvrage cité. — Pour les mouvements rotatoires moléculaires, voyez *Bull. météorol. de l'Observatoire de Paris*, 17 décembre 1863 (M. de Colnet d'Huart).

clusions ; contentons-nous de hâter par nos vœux la venue du jour où la philosophie naturelle sera délivrée de ces puissances imaginaires et mystérieuses.

Nous allons actuellement examiner les phénomènes électriques et chercher quels arguments ils fournissent à l'appui de notre système.

---

tincts : à l'état de tension, elle se manifeste par des attractions et des répulsions exercées sur les corps légers; à l'état de *courant électrique*, elle se reconnaît facilement par la déviation qu'elle fait subir à une aiguille aimantée. L'électricité de tension devient courant électrique toutes les fois qu'il se produit une décharge entre des corps électrisés; cette décharge peut se faire *silencieusement* à travers un conducteur; d'autres fois, au contraire, elle est *explosive* lorsque, par exemple, elle éclate violemment dans l'air en s'accompagnant d'une production de chaleur et de lumière. Les faits que nous venons de rappeler sommairement sont connus de tous, et, pour être clairs, il nous a fallu employer les expressions communément reçues. Ces expressions impliquent certaines idées systématiques, car, à mesure que les physiciens découvraient de nombreux phénomènes, ils imaginaient, pour les représenter, des dénominations fondées sur les analogies qui leur paraissaient les plus évidentes. Il serait donc nécessaire d'examiner la valeur de ces termes, afin de reconnaître si nous devons continuer à les employer; cependant, pour faciliter l'intelligence du sujet, nous continuerons à parler le langage habituel des électriciens, mais nous prévenons le lecteur que parfois les mots employés paraîtront contredire nos idées.

Des phénomènes de tension qui cependant furent les premiers découverts, il est difficile de tirer des notions exactes sur la nature de la force électrique; mais leur importance est telle, que nous devons leur accorder la première place dans notre résumé des faits principaux de l'électricité, nous réservant de donner plus tard leur explication.

La force électrique se manifeste toujours sous deux modalités *égales* et *opposées*, nommées l'une *positive*, l'autre *négative*, parce que, toutes les fois qu'elles se développent,

elles sont d'égale intensité, et, de plus, si leurs tensions présentent la même intensité, réunies elles rétablissent l'état naturel des corps, c'est-à-dire leur condition habituelle. Ces locutions sont indépendantes de toute théorie, elles sont la traduction immédiate des faits. Dans tous les cas où, par les rapports établis entre deux corps, la force électrique prend naissance, elle apparaît constamment sous ses deux formes à la fois, l'un des corps se constituant à l'état *positif* et l'autre à l'état *négatif*. Le mode d'excitation peut être une action mécanique, telle que frottement, pression, percussion, ou une réaction chimique, ou une influence thermique, peu importe, le résultat reste toujours le même. Dans ces expériences, une même substance ne présente pas invariablement le même état électrique, et le sens de son électrisation dépend des conditions de l'expérience elle-même; telle substance qui est positive avec un corps donné est négative avec un autre. Lorsqu'on expérimente sur des corps de même nature, l'effet résultant dépend du degré de poli ou d'âpreté de la surface, de l'étendue plus ou moins grande sur laquelle opèrent les agents mécaniques, de la température plus ou moins élevée de l'un des corps en présence, etc. Nous pouvons donc énoncer cette règle générale : *L'état électrique que prend un corps n'a rien d'absolu, il est purement relatif.*

La force électrique est caractérisée par les attractions et les répulsions qui s'observent, suivant leur état électrique semblable ou opposé, entre masses rendues convenablement mobiles. On admet comme principe fondamental de l'action de la force électrique que *les corps électrisés de la même manière se repoussent, et ceux électrisés contrairement s'attirent.* On a d'abord regardé ces attractions et ces répulsions comme s'exerçant à distance. Dans la suite, les faits étant mieux interprétés, on reconnut qu'il fallait tenir grand compte des conditions du phénomène. Ainsi : 1° l'intervalle qui sépare

les corps électrisés peut être occupé par une substance pondérable, ou bien : 2° les corps électrisés sont placés dans le vide absolu. Dans le premier cas, d'après les recherches de Faraday et de Matteucci, il se produit au sein du milieu interposé une modification nommée *induction*, par l'intermédiaire de laquelle l'action électrique se transmet d'un corps à l'autre. Les effets d'induction diffèrent avec les substances : ainsi, dans certaines substances, dites isolantes, telles que l'air, le verre, la gomme laque, etc., tout se réduit à un simple jeu de force intermoléculaire, s'établissant progressivement dans les couches successives de la substance. Voici un exemple : un paquet de feuilles de mica étant enfermé entre deux armures métalliques qui reçoivent des tensions électriques opposées, chacune des feuilles se montre électrisée, et le signe de l'état électrique appartenant à l'une de ses faces est contraire à celui de l'armure vers laquelle cette face est tournée, tandis que de l'autre côté la feuille de mica est électrisée semblablement à cette même armure. Toute discussion sur ce sujet serait prématurée actuellement, nous la renvoyons à un chapitre suivant. Reste le second cas, celui des corps électriques placés dans le vide absolu; malheureusement ici les résultats fournis par l'observation sont loin d'être concluants. Nous en parlerons bientôt.

Les métaux sont électrisables par le frottement, mais les effets de la force électrique ne se manifestent que lorsque les métaux sont isolés, autrement cette force se perd dans le sol. De plus, c'est en opérant sur des masses métalliques que l'on peut observer les phénomènes d'induction les plus nets et les mieux caractérisés. Un conducteur isolé étant placé à une distance convenable d'une source électrique, aussitôt l'extrémité la plus voisine de la source s'électrise contrairement, et l'extrémité opposée semblablement au corps inducteur, de telle sorte que la distribution de la force électrique semble se faire d'une

manière continue sur toute la surface induite, c'est-à-dire que l'on n'observe point cette succession de tranches à signes alternativement contraires, dont on constate l'existence dans les corps isolants.

On a prétendu que la force inductrice se propageait en lignes courbes [1], car ses effets ont été observés sur certaines parties de corps tellement disposés qu'il était impossible de concevoir une action rectiligne; et on rappelait, à ce propos, que les émanations lumineuses des corps électriques affectent des directions curvilignes. Mais c'était confondre la ligne géométrique, qui représente une certaine intensité constante de la distribution électrique autour d'un corps, avec la ligne de propagation de la force elle-même; or, tandis que celle-ci est essentiellement droite, l'autre peut être courbe.

Les théories imaginées par les physiciens et adoptées par les géomètres dans le but de représenter les phénomènes électriques jouissent d'une telle célébrité, qu'il importe sur ce point de rappeler immédiatement qu'elles sont de pures hypothèses, et qu'elles ne nous apprennent rien sur la nature de la cause. Nous ne pouvons pas en ce moment parler en détail de la force électrique, mais il est indispensable de rappeler les lois fondamentales de son action.

1° La force électrique agit en raison inverse du carré de la distance.

2° Elle ne peut se manifester en l'absence de la matière pesante, les expériences récentes de Grove et de Gassiot, faites au milieu du vide obtenu par procédé chimique, ont prouvé que dans un espace privé de matière pesante, la décharge électrique directe ne passe pas. Il n'a pas encore été possible de décider si une action inductrice pure et simple est transmissible à travers le vide; car les expériences faites sous le récipient de

[1] Faraday. (*Note du traducteur.*)

la machine pneumatique ne sont nullement concluantes.

3° Elle se range parmi les forces expansives. Arrivée à un certain degré d'intensité, elle sépare de la substance électrisée des parcelles en quantité appréciable à la balance, et les met en vibration calorifique et lumineuse. Telle est le cas de la décharge *disruptive* ou par *étincelle*. Il est établi d'une façon indubitable que l'étincelle consiste dans une volatilisation et une combustion de parcelles détachées des corps entre lesquelles elle éclate; en effet, l'analyse spectrale de l'étincelle fournit une bande colorée composée entièrement des raies lumineuses caractérisant les métaux transmettant la décharge. La diffusion lumineuse des solides ne diffère pas au fond de celle qu'on observe lorsque l'électricité se décharge à travers un fluide; ainsi l'eau est rapidement dispersée et diffusée par la décharge électrique.

Les traits de feu que l'on tire des métaux électrisés, les aigrettes brillantes qui apparaissent quelquefois à leur surface, ne sont pas les seuls effets lumineux de l'électricité; de toutes les substances isolantes frottées ou frappées dans l'obscurité au milieu d'une atmosphère suffisamment sèche, on peut faire jaillir une étincelle; quelques-unes émettent de vives lueurs lorsqu'on les brise (sucre, soufre, chlorure de calcium, etc.). Ces lueurs ont certainement une origine électrique, elles sont produites par l'agitation moléculaire dans les points soumis à l'action mécanique. On les a d'abord nommées phosphoriques; mais elles diffèrent essentiellement de celles produites par le phosphore, car ces dernières accompagnent ordinairement l'oxydation du métalloïde, et les lueurs électriques sont provoquées par certains mouvements moléculaires, ou par l'agitation et les variations de pression dans l'atmosphère ambiante[1]. Nous avons déjà indiqué

[1] Voyez Bizio, *Dinamica chimica*, t. I, page 104.

les causes de la phosphorescence, et nous pouvons en conclure que si la décharge électrique s'accompagne de brillants phénomènes lumineux, cela tient à ce qu'elle ébranle violemment les molécules superficielles des corps; surtout dans ceux où, soit par une pulvérisation, soit par une attrition préalable, la cohésion a été grandement affaiblie.

On s'est demandé si cette tendance à l'expansion, cet effort incessant vers l'extérieur, propre aux particules de la surface, se rencontrait exclusivement dans les corps, alors qu'ils sont soumis aux influences électrisantes, ou bien si elle y existe constamment, même quand ils sont à l'état naturel.

Au livre I[er], chapitre VIII, nous avons dit que Fusinieri, Bizio et Zantedeschi ont réuni un grand nombre de faits tendant à prouver que les corps, pour la plupart, dans les conditions ordinaires, laissent échapper incessamment des émanations matérielles. Cette émission de particules constitue l'évaporation dans les liquides, et la sublimation lente dans les solides; celle-ci est habituellement insensible à la température ordinaire, mais elle se développe considérablement à un degré thermométrique plus élevé. La vaporisation lente des corps maintenus à l'état naturel, qui reproduit sur une moindre échelle l'émission de particules matérielles qui accompagnent les décharges électriques, est rendue palpable par l'expérience suivante. Lorsqu'on dirige l'étincelle d'une batterie à travers une médaille frottée de plombagine posée à plat sur une feuille de papier ou de verre, on obtient une reproduction exacte de la pièce dessinée sur la surface employée, image que l'on peut rendre très-apparente en y projetant un mélange de minium et de soufre, ou simplement l'humidité de l'haleine[1]. Ces effets, à l'intensité près, ne diffèrent point des empreintes laissées par la foudre lorsqu'elle retrace, à des

[1] Figures de Lichtenberg et images de Morren.

distances souvent très-grandes, le contour des objets atteints par la décharge.

Les faits mentionnés jusqu'ici et un grand nombre d'autres semblables nous conduisent à regarder *les phénomènes produits par la tension électrique comme causés simplement par l'exagération des mouvements à la surface des corps*. Afin d'expliquer ces mouvements, plusieurs physiciens ont admis certaines forces répulsives, toujours agissantes, alors même que les corps sont dans le plus grand repos apparent. Il n'entre pas dans notre sujet d'établir cette proposition par voie expérimentale, nous nous bornerons à montrer toute la rationalité d'une telle hypothèse.

D'après la théorie moderne de la chaleur, nul doute que la force répulsive en question ne diffère pas du mouvement thermique lui-même, lequel se manifeste avec plus de facilité à la surface libre des corps, car l'influence attractive des sphères d'activité moléculaire y est très-affaiblie. Quelque idée qu'on se fasse de la constitution des corps, cette conclusion subsiste toujours; or les phénomènes de l'optique nous ont révélé l'existence de l'éther dans tous les corps. Nous sommes donc naturellement amenés à nous demander si l'éther ne joue pas un rôle dans le mouvement incessant des molécules superficielles.

Assurément la réponse ne saurait être douteuse lorsqu'on admet l'existence de l'éther comme démontrée par l'étude de la lumière; mais faisons pour un instant abstraction des connaissances acquises dans le livre précédent, et examinons à quelles conclusions nous conduira l'analyse des phénomènes électriques; réservant toute affirmation sur la nature de la matière qui entre en mouvement jusqu'au moment où, les faits eux-mêmes ayant éclairé le sujet et fourni des données positives, il nous sera permis de formuler une opinion.

Donc, pour le moment, nous ne savons pas s'il existe

un fluide électrique, encore moins si ce fluide est identique avec l'éther, et nous laissons à l'observation le soin de nous renseigner. Cela posé, sans nous astreindre à suivre l'ordre chronologique des découvertes, nous aborderons immédiatement l'examen des faits les plus propres à nous donner des notions précises sur la force électrique, l'une des plus puissantes de la nature. Il est bon de rappeler au lecteur que dans cette étude nous conserverons la terminologie usuelle; aussi, quand il nous arrivera d'employer des expressions paraissant impliquer une hypothèse particulière, cela ne sera jamais intentionnellement, car nous nous servirons des termes consacrés sans rechercher, au moins pour l'instant, si leur signification est exacte ou non.

CHAPITRE II

PREMIÈRES RECHERCHES SUR LA NATURE DU COURANT ÉLECTRIQUE. ACTIONS ÉLECTRO-DYNAMIQUES.

Les phénomènes de tension présentés par les corps électrisés statiquement nous donnent bien la preuve de l'existence d'une force résidant à la surface des corps, mais ils ne nous apprennent rien touchant les modifications intérieures qui peuvent être déterminées par elle; heureusement le rhéomoteur ou *pile* imaginée par Volta nous permet d'étudier ces effets sous les aspects les plus variés. Lorsque, cet appareil étant isolé, on l'étudie sous le rapport de la tension, on trouve ses deux extrémités électrisées l'une positivement, l'autre négativement, mais il serait impossible encore aujourd'hui de dire en quoi consistent physiquement ces deux états électriques différents. Une seule chose est parfaitement démontrée, c'est que les attractions, les répulsions, les effets calorifiques

et physiologiques produits par la pile ne diffèrent pas des phénomènes de même genre produits par un corps électrisé à l'aide du frottement. Cette identité reconnue d'abord par Volta lui-même a été définitivement établie par Faraday. D'où on a conclu que la même force électrique pouvait avoir des origines différentes.

Vient-on à réunir les extrémités d'une pile au moyen d'un conducteur, alors apparaissent des phénomènes d'un tout autre genre. Si le conducteur est un liquide décomposable, il se réduira en ses éléments, qui, une fois séparés, se dirigeront, les uns vers le pôle positif, les autres vers le négatif. Si la communication interpolaire est établie à l'aide d'un fil métallique, il s'échauffera, bien plus il pourra fondre, de même que cela lui arriverait sous l'influence d'une décharge de Leyde ; en outre, il influencera les aiguilles aimantées, les attirera ou les repoussera, et il produira divers autres effets mécaniques dans le cas où certaines parties du circuit sont rendues mobiles à l'aide de dispositions spéciales. Tous ces phénomènes différant entièrement de ceux dont il a été question jusqu'ici, la *ligne affectée par la force électrique* (cette expression a l'avantage d'être indépendante de toutes vues théoriques), ou bien encore le *courant*, en employant le terme reçu habituellement, nous fournit de nouvelles données sur le mode d'action de la force électrique, et il nous permettra d'éclairer les phénomènes de tension.

Les effets que nous venons de rappeler succinctement sont décrits tout au long dans les cours élémentaires de physique ; nous ne nous arrêterons donc pas à leur explication ; il nous suffit de faire remarquer que ceux obtenus lorsqu'on ferme le circuit d'une pile diffèrent seulement par l'intensité de ceux que l'on obtiendrait en réunissant, à l'aide d'un fil métallique, les coussins de la machine électrique ordinaire avec ses conducteurs. Cependant la pile nous offrant une plus grande facilité pour répéter les

diverses expériences, elle est employée de préférence dans les démonstrations. Fidèle à la marche suivie dans les chapitres précédents, nous exposerons d'abord les faits, puis nous chercherons à les interpréter.

Commençons par les propriétés fondamentales du courant. Une des particularités caractéristiques du courant, c'est d'avoir *une direction déterminée*, si bien qu'il produit deux séries de phénomènes inverses, en allant du zinc au cuivre et en circulant du cuivre au zinc. On admet que le courant circule du pôle positif au pôle négatif, dans les conducteurs, c'est-à-dire, que l'on nomme sens du courant celui du dégagement de l'hydrogène, lors de la décomposition électrolytique de l'eau. D'où il résulte que le sens du courant, dans un fil réunissant le pôle zinc au pôle cuivre, sera la direction prise en allant du dernier zinc au premier cuivre.

Cette propriété du courant d'avoir une direction est encore rendue très-manifeste par les découvertes d'Œrsted. Avant ce physicien, dans toutes les expériences relatives aux attractions et aux répulsions produites par la pile, on avait toujours maintenus séparés les pôles; aussi obtenait-on simplement les attractions et les répulsions ordinaires propres aux corps électrisés par tension. Œrsted employant dans ses expériences une aiguille aimantée, comme moyen électroscopique, eut le bonheur de voir l'aiguille, qui se mouvait à peine lorsque les pôles étaient séparés, se dévier, au contraire, très-fortement lorsque le circuit conducteur était fermé.

Même en regardant l'observation dont nous venons de parler comme due à un heureux hasard, nous ne saurions trop admirer toute la sagacité déployée par le physicien danois dans l'étude des lois du nouveau phénomène, dont il varia les conditions de toutes les façons imaginables. Aussi fit-il connaître la série complète des résultats que l'on peut obtenir en faisant agir sur une aiguille

aimantée un conducteur traversé par la force électrique. La règle suivante résume tous les cas. Supposons une aiguille aimantée, en équilibre, et un fil traversé par le courant placé au-dessus d'elle parallèlement à sa longueur, la pointe nord de l'aiguille dévie vers l'ouest ou vers l'est, suivant que le courant s'avance vers le nord ou vers le sud; le contraire se produit si le fil est au-dessous de l'aimant.

Œrsted essaya de donner une théorie de ces faits, il les rapportait à une *polarité transversale* communiquée au fil par le courant électrique. D'après ses idées, un fil traversé par le courant pouvait être assimilé à un assemblage d'aimants très-petits, perpendiculaire à sa longueur, il n'était donc pas étonnant de voir l'aiguille se mettre en croix avec sa direction, car ainsi elle devenait parallèle aux aimants moléculaires. A l'exception des phénomènes qui lui ont donné naissance, aucun fait nouveau ne vient appuyer cette théorie, aussi doit-elle être considérée comme une façon particulière d'exposer les résultats obtenus, ingénieuse, il est vrai, mais qui ne repose sur aucune démonstration solide.

Ces découvertes furent connues en France quelques mois après leur publication, et aussitôt elles attirèrent l'attention d'Ampère. Il aborda cette question avec la supériorité que seule peut donner une connaissance approfondie des mathématiques; en quelques semaines, une science nouvelle était créée; et c'est à juste titre qu'Ampère a été nommé le Newton de l'*électro-dynamie*.

La théorie d'Œrsted fut promptement abandonnée, car on reconnut qu'elle péchait par deux points capitaux: 1° elle explique l'inconnu par l'inconnu; en effet, qu'est-ce que la polarité? Et, en particulier, la polarité magnétique? On a tellement abusé de cette expression, qu'un esprit positif hésite à l'accepter si préalablement elle n'est pas rigoureusement définie; or Œrsted avait négligé ce premier point. 2° La théorie de la pola-

rité dans certains cas, dont nous parlerons plus loin, oblige à admettre une force agissant perpendiculairement à la ligne tirée du centre d'attraction au point attiré; hypothèse contraire aux lois qui régissent toutes les autres forces, car leur action s'exerce constamment suivant la ligne droite passant par les points sollicités.

Ampère, guidé par certaines idées sur la constitution de la matière, retourna l'hypothèse d'Œrsted, et il regarda les aimants comme des courants. L'idée-mère de la nouvelle théorie fut cette considération que la terre fonctionne comme un vaste aimant, et qu'il est fort problable que ses propriétés magnétiques sont la résultante des nombreux courants électriques développés dans le globe terrestre par des actions chimiques et thermiques; étendant son raisonnement aux aimants en général, il réussit à reproduire tous les phénomènes magnétiques à l'aide de simples combinaisons de fils de cuivre parcourus par des courants, nommés *solénoïdes*. Le point de départ de son raisonnement était le fait d'expérience suivant : si un conducteur présente des sinuosités peu prononcées, son action est semblable à celle d'un conducteur rectiligne, ayant mêmes extrémités que le fil sinueux ; ceci posé, il en conclut que la composition des forces génératrices du courant s'opérait suivant les règles connues de la statique ordinaire; seulement on devait tenir compte, non-seulement des attractions variant en raison inverse du carré de la distance, mais aussi de la *direction* du courant dans le conducteur. Par ses recherches analytiques, il arriva ensuite à une conclusion extrêmement importante. Deux éléments de courant s'attirent en raison composée directe de leurs intensités respectives, inverse du carré des distances, et directe d'une certaine fonction des angles formés par leurs directions. Nous devons remarquer, au sujet de cet énoncé, que l'action entre deux courants angulaires peut être remplacée par deux autres : une attrac-

tive entre les éléments parallèles en lesquels se peuvent décomposer les courants; une autre, répulsive entre deux éléments placés sur une même ligne droite, et ces actions partielles sont dans un rapport constant — $\frac{1}{2}$. Par suite, les parties consécutives d'un même courant se repoussent.

D'où il résulte les lois suivantes pour les courants finis :

1° Deux courants parallèles s'attirent quand ils sont de même sens et se repoussent quand ils sont de sens contraire.

2° Deux courants angulaires tournent autour de leur perpendiculaire commune jusqu'à devenir parallèles et de même sens.

3° Deux systèmes de courants circulaires parallèles fixés à un même axe perpendiculaire à leur plan (*solénoïdes*) s'attirent et se repoussent mutuellement à la manière de deux aimants.

4° Les aimants ont toutes les propriétés des solénoïdes.

Les faits observés par Œrsted rentraient ainsi dans la théorie générale en qualité de cas particuliers, et leur explication ne nécessitait pas de recourir à des principes autres que ceux reçus en mécanique pour la composition des mouvements.

Mais à bien examiner les choses, jusque-là la question avait été simplement retournée, Œrsted assimilant les courants à des aimants, Ampère, au contraire, assimilant les aimants à des courants. De telle sorte qu'on traitait dans un cas comme dans l'autre de phémonènes statiques, de phénomènes d'équilibre entre forces que l'on peut concevoir *émaner de centres fixes*, et ainsi on ne sortait pas du cercle des forces connues jusqu'alors. On ne tarda pas à faire une série de découvertes d'un genre tout nouveau, qui fournirent des données fort utiles pour déterminer la vraie nature des phénomènes déjà connus. Nous

voulons parler de la rotation continue des aimants, constatée par Faraday.

Cette expérience remarquable, résultat d'idées théoriques fausses, fut bientôt suivie par une autre que Savary déduisit de la théorie rationnelle et des formules d'Ampère. Il montra que les mêmes phénomènes de rotation s'observent sur les conducteurs traversés par les courants.

Si (fig. 20) l'on fait flotter un aimant cylindrique *ab* dans

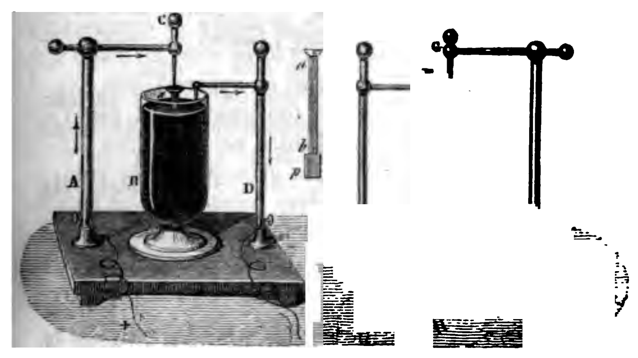


Fig. 20. Fig. 21.

une masse de mercure, en le lestant au moyen d'un morceau de platine *p*, de telle sorte que son axe soit vertical, lorsque, par les conducteurs A, C, D, on dirige un courant énergique à travers l'aimant et le mercure, l'aimant prend un mouvement de rotation assez rapide, bien que le mercure, à cause de sa grande densité, exerce sur lui un frottement très-notable. Bien plus (fig. 21), en plaçant simplement les rhéophores en deux points différents du mercure, l'un au centre en G, l'autre à la circonférence en E, l'aimant flotteur présente un double mouvement de translation et de rotation qui rappelle à l'esprit les mouvements planétaires, et tout cela malgré la résistance énorme du

bain métallique. Ces faits conduisirent à admettre entre l'aimant et le mercure une force tangentielle perpendiculaire à la droite qui réunit les deux corps. Mais Ampère montra que cette action tangentielle n'est pas primitive, qu'elle est réellement un effet secondaire, facile à expliquer, d'après les lois connues des courants électriques, pourvu que les conducteurs ne forment point un circuit parfaitement fermé, car, dans ce cas, les courants agissent exclusivement comme forces dirigées vers un centre fixe, et sont dès lors incapables de produire la composante tangentielle et l'accroissement de force vive. En confirmation de cette théorie, il a construit un appareil dans lequel un conducteur mobile tourne continuellement par l'action d'une spirale circulaire. Toutes ces questions furent constamment traitées d'après les principes de la composition des forces que l'on considère habituellement en mécanique; de telle sorte que les forces transversales, admises d'abord pour expliquer certains phénomènes, furent complétement abandonnées, les faits signalés rentrant dans les règles ordinaires.

Ces faits sont importants au point de vue théorique; ils ne nous apprennent pas encore à la vérité en quoi consiste ce que l'on nomme un courant, mais ils nous montrent que les conducteurs ne sont pas dans l'état de simple équilibre statique, nommé ordinairement polarité; ils présentent une autre activité, susceptible de vaincre la résistance des frottements exercés par les milieux dans lesquels ils sont immergés, et ils sont animés par une force produisant un *travail*, par une force qui leur restitue la force vive absorbée par les frottements. Dans la polarité les forces développées sont toujours réductibles à des systèmes de forces dirigées vers des centres fixes : durant le cercle complet de leur action, elles ne peuvent pas produire un accroissement de force vive, elles sont donc insuffisantes pour expliquer la nombreuse classe des faits en question.

Ampère reconnut parfaitement l'importance de ces découvertes, et il écrivait : « Un mouvement qui se continue toujours dans le même sens, malgré les frottements, malgré la résistance des milieux, *et ce mouvement produit par l'action mutuelle de deux corps qui demeurent constamment dans le même état*, est un fait sans exemple dans tout ce que nous savions des propriétés que peut offrir la matière inorganique il prouve que l'action qui émane du conducteur voltaïque ne peut être due à une distribution particulière de certains fluides en repos dans ces conducteurs, comme le sont les attractions et les répulsions ordinaires. *On ne peut attribuer cette action qu'à des fluides en mouvement dans les conducteurs* qu'ils parcourent en se portant rapidement d'une des extrémités de la pile à l'autre[1]. »

Ces faits prouvent que ce que nous avions nommé courant est un véritable *état dynamique de la matière*, c'est-à-dire un mouvement s'accomplissant à l'intérieur du conducteur. Reste maintenant à chercher de quel genre est ce mouvement[2]. Évidemment ce ne peut être qu'un certain mode de vibration, car dans les mouvements vibratoires la force vive du système devenant périodiquement nulle, ils ne peuvent donner comme résultante extérieure un mouvement de translation : ici la vibration doit s'accompagner d'une véritable translation moléculaire ; ou, comme le disait fort bien Ampère, d'un mouvement de fluides. Avant de quitter le passage d'Ampère que

[1] *Recueil d'observations électro-dynamiques*, p. 205, 8 avril 1822, et p. 297.

[2] Il est surprenant de voir Grove sur un point aussi capital recourir encore aux forces transversales, alors que l'impossibilité d'expliquer les expériences d'Ampère à l'aide de ces forces est démontrée. Bien plus, les travaux de l'illustre physicien français ne sont cités nulle part dans le livre *sur la corrélation des forces physiques* (voir page 137). Il est aisé de présenter une théorie sous un jour favorable en laissant dans l'ombre les points difficiles.

nous venons de rapporter, faisons remarquer la première partie marquée en italique. Dans ces lignes, l'auteur, parlant le langage de son époque, semble admettre que les corps d'où émanent les forces génératrices du courant demeurent dans un état invariable; opinion manifestement erronée. Nul courant électrique ne peut se produire sans une modification correspondante de la substance constituant l'électromoteur; dans la pile cette modification consiste en une altération chimique des liquides et de l'un des métaux employés. Lorsqu'on veut établir une pile, le contact des éléments est nécessaire, car il assure la conduction de la force électrique; peut-être, et c'est déjà beaucoup dire, il ajoute à l'action électromotrice, mais les phénomènes électrodynamiques nous apprenant que le courant, dans certains cas, produit de la force vive d'une façon continue, cette force vive ne peut être créée de rien, elle prend donc sa source au sein de l'appareil qui fournit le courant; dans la pile, cette source est indubitablement l'altération chimique de ses éléments. Nous pouvons dès lors regarder comme tranchée la fameuse question de savoir quelle est l'influence du contact des métaux dans la pile.

Ampère conclut franchement que ces phénomènes sont très-probablement dus au transport d'un fluide, et, suivant nous, il a raison; mais cette hypothèse a été combattue par certains physiciens qui attribuent le développement du courant à un mouvement vibratoire. Afin d'être à même de décider la question, il nous faut préalablement étudier plus sérieusement l'origine et la propagation du courant. En ce moment, nous nous abstiendrons de prononcer entre les deux hypothèses; toutefois la production de mouvements, que des résistances et des frottements incessants ne parviennent pas à détruire, nous oblige à regarder la pile comme une machine en activité, dans laquelle la force est engendrée en certains points, absorbée en d'autres ou

plutôt transformée en travail extérieur, travail qui peut être très-différent de celui obtenu avec les machines ordinaires, mais dont le développement est soumis aux lois générales de la dynamique.

CHAPITRE III

EFFETS CALORIFIQUES DU COURANT. NOTIONS QU'ILS NOUS FOURNISSENT SUR SA NATURE.

Que le courant soit un mouvement dans l'intérieur des conducteurs, et non une simple disposition statique de la matière, on ne doit plus en douter d'après les recherches d'Ampère citées dans le chapitre précédent. Le travail mécanique continu produit dans certains cas par le courant, suppose une force vive, continue qui seule peut engendrer une matière en mouvement. Aussi à juste titre a-t-on appelé ces phénomènes *électro-dynamiques*, car ils dérivent d'une action *dynamique* qui affecte le conducteur. Du reste, non-seulement le courant engendre le travail mécanique proprement dit, lorsque, par exemple, en le traversant, il met en rotation les conducteurs mobiles ou au moins les liquides, mais encore, dans un circuit voltaïque, il se manifeste constamment une action thermique suffisante parfois pour porter à l'incandescence et volatiliser les électrodes et une action chimique étrangère à celle du rhéomoteur; or, tous ces effets sont autant de genres de travail qui tous supposent un mouvement initial et une force génératrice.

Les phénomènes magnétiques et chimiques montrent dans le mouvement du courant une *direction, définie et réversible* avec le conducteur matériel affecté par l'électricité ; par suite, l'action dépend de l'angle formé par les conducteurs; condition qui n'appartient pas aux mouve-

ments vibratoires. Cette *réversibilité* (qu'on nous permette l'expression) distingue le courant du mouvement thermique, on peut donc le définir *un mode* de *mouvement ayant une direction définie et réversible*[1].

Mais on demandera de quelle nature est ce mouvement; est-ce le mouvement de translation d'un fluide, comme le nom de courant semblerait l'indiquer? est-ce un simple mouvement oscillatoire analogue, mais non identique au mouvement thermique? est-ce un mouvement de la matière ordinaire ou au contraire de la matière impondérable? est-ce enfin un simple transport de la matière pesante réduite à ses éléments dynamiques? La réponse à ces questions n'est point facile à donner, chacune des hypothèses précédentes a joui dans son temps d'une grande faveur, chacune d'elles a été soutenue par des auteurs distingués; aussi, pour nous décider en faveur de l'une d'elles, il nous faut consulter les faits, et en particulier ceux relatifs à l'échauffement des fils traversés par le courant, car ils sont de nature à éclairer notre choix.

L'expérience a démontré que, toute influence perturbatrice étant écartée, le dégagement de la chaleur dans un fil traversé par un courant est soumis à certaines lois dont voici les principales :

1° La température finale d'un fil ayant une épaisseur constante est égale dans toutes les sections du circuit, le courant conservant la même intensité; 2° Dans un fil de section variable la température varie en raison inverse du carré de la section; 3° Malgré les variations de température et de section l'intensité du courant en chaque point du circuit reste constante.

Avant tout il est nécessaire de préciser la signification

[1] Cette définition du courant ne s'éloigne pas beaucoup de celle de Faraday. Elle est sans doute incomplète; mais elle est si générale, qu'elle embrasse le phénomène dans son genre le plus prochain : reste à fixer la différence dernière selon les préceptes des logiciens.

du mot *intensité*. Nous disons que deux courants ont la même intensité, lorsqu'ils font dévier d'un même nombre de degrés[1] l'aiguille aimantée d'un même galvanomètre; quelle que soit du reste l'origine du courant. Or, d'après une loi fondamentale des courants électriques, une aiguille aimantée ou un conducteur électro-dynamique mobile, étant placé dans un circuit interpolaire, indique dans toutes les sections la même intensité ou quantité d'action, quand bien même avant ou après lui il existe certains points en lesquels se produit un travail électro-magnétique ou chimique, ou un travail calorifique intense tel que la lumière électrique. A l'aide de la boussole nous voyons que dans toutes les sections la force statique du courant est la même, et d'autre part le conducteur électro-dynamique mobile nous montre que dans toutes les sections il s'accomplit un travail constant, et qu'il se développe une égale quantité de force vive. De même l'action chimique conserve une égale intensité dans toutes les sections du courant, aussi est-il indifférent d'intercaler un voltamètre en tel ou tel point d'un fil rhéophore, le résultat obtenu ne change pas; si, au lieu d'un fil unique, nous employons deux fils égaux entre eux et au premier pour la longueur et ayant chacun une section moitié de celle du fil primitif (de cette façon la résistance du circuit ne change pas), avec chacun de ces deux fils on obtiendra une déviation moitié de celle observée lorsqu'on expérimentait sur un seul fil. Dans ce cas, le flux restant le même dans tout le circuit, et sa vitesse ne pouvant être changée en rien, seule la masse animée de mouvement, c'est-à-dire la *quantité*, est réduite à moitié, on peut donc dire que la boussole permet de mesurer la quantité d'électricité en mouvement.

Réciproquement si, un fil métallique étant placé dans

[1] Nous parlons de degrés ramenés à la même valeur proportionnelle suivant les procédés indiqués dans les traités élémentaires.

un calorimètre, on emploie la force du courant à échauffer une masse d'eau[1], on trouve que la température est proportionnelle à la longueur du fil et au carré de la déviation de la boussole, résultat conforme à la seconde loi. Or, dans cette expérience la masse pesante restant constante, la vitesse a dû varier, mais les températures sont proportionnelles aux forces vives acquises par les molécules, et les forces vives sont entre elles comme les carrés des vitesses; donc ici la boussole mesure un élément dynamique proportionnel à la vitesse du courant, ou, en autre terme, la quantité du flux qui la traverse dans un temps donné. En effet soient t et t les températures D et D' les déviations, on a $\frac{t}{t'} = \frac{D^2}{D'^2}$; mais la masse pesante échauffée restant constante, on a $\frac{t}{t'} = \frac{v^2}{v'^2}$, donc $\frac{D}{D'} = \frac{v}{v'}$.

Nous avons vu un peu plus haut que la boussole mesurait la masse; par conséquent, elle mesurera le produit de la masse par la vitesse de l'électricité, c'est-à-dire la *quantité* d'électricité qui passe dans un temps donné. D'après cela, la boussole peut être comparée aux instruments employés en hydraulique à la mesure des cours d'eau, dans lesquels, comme dans le pendule hydrométrique, on estime la vitesse du liquide d'après la valeur de l'angle que fait avec

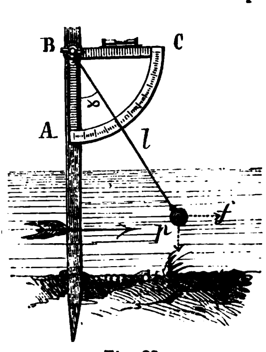


Fig. 22.

[1] On peut employer simplement un fil de platine, immergé dans un vase contenant l'eau, mais il faut alors tenir compte des pertes.

la verticale AB une pièce pesante *pl* mobile autour du centre B de l'arc divisé AO (fig. 22). Il en est de même de la balance rheumamétrique[1].

La deuxième loi relative à l'influence de la section nous montre que le mouvement qui constitue le courant n'est pas la simple vibration thermique de la matière pesante du conducteur, mais un véritable flux de quelque matière. En effet, l'intensité de la force vive de la vibration thermique est exprimée dans chacune des sections du fil par $mv^2 = m'v'^2$, d'où $\frac{m}{m'} = \frac{v'^2}{v^2}$, et dans les diverses sections

[1] Comme exemple de balance rheumamétrique, on peut citer le rhéomètre de Poletti (fig. 23), dans lequel le cours d'eau agit sur la

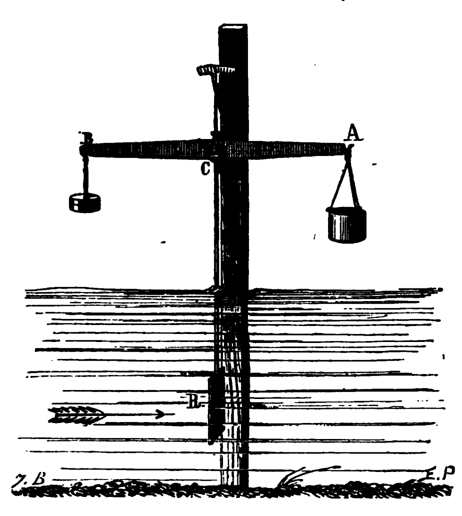


Fig. 23.

palette R et incline le fléau BCA. La charge qui, placée en A, rétablit l'équilibre de la barre oscillante, mesure en kilogrammes et fractions de kilogrammes l'énergie du courant. (*Note du traducteur.*)

la masse de matière ébranlée étant proportionnelle à l'aire de la section on, aura $\frac{m}{m'}=\frac{\omega}{\omega'}$, d'où

$$\frac{\omega}{\omega'}=\frac{v'^2}{v^2}.$$

Les températures étant dans le rapport du carré des vitesses, il en résulte $\frac{f'}{f}=\frac{v'^2}{v^2}$, d'où

$$\frac{\omega}{\omega'}=\frac{t'}{t},$$

c'est-à-dire que la température devrait être en raison inverse et simple des sections si le courant était constitué par une simple vibration. Mais l'expérience établit que ces mêmes températures sont inversement proportionnelles au carré des sections, c'est-à-dire que nous avons

$$\frac{\omega^2}{\omega'^2}=\frac{t'}{t},$$

donc il est impossible d'admettre l'hypothèse précédente.

Mais, au contraire, si dans la formule

$$\frac{\omega^2}{\omega'^2}=\frac{t'}{t},$$

qui est purement expérimentale, on substitue aux températures le carré des vitesses auxquelles elles sont proportionnelles, on obtiendra l'égalité

$$\frac{\omega'^2}{\omega^2}=\frac{v'^2}{v^2},$$

d'où

$$\omega v=\omega' v',$$

ce qui revient à dire que les vitesses qui animent les molécules sont en raison inverse des sections.

Cette règle est précisément celle qui, formulée par Léonard de Vinci touchant l'écoulement des fluides, est nommée habituellement loi de la continuité ou encore de Castelli[1]. A la vérité les vitesses introduites dans la formule indiquée sont les vitesses thermiques, c'est-à-dire les vitesses de conduction par les substances employées, seules quantités qui puissent être déterminées expérimentalement, mais il vient d'être établi que le mouvement thermique des molécules pondérables ne peut à lui seul constituer le courant électrique; par conséquent, il n'y qu'un moyen de comprendre cette loi, c'est de supposer dans l'intérieur du fil un flux imprimant aux molécules des vitesses proportionnelles à celle qu'il possède lui-même. Nous voilà encore ramené à cette conclusion que la boussole permet de mesurer la quantité de flux électrique qui passe en un temps donné.

On doit à Plüker une belle expérience qui rend sen-

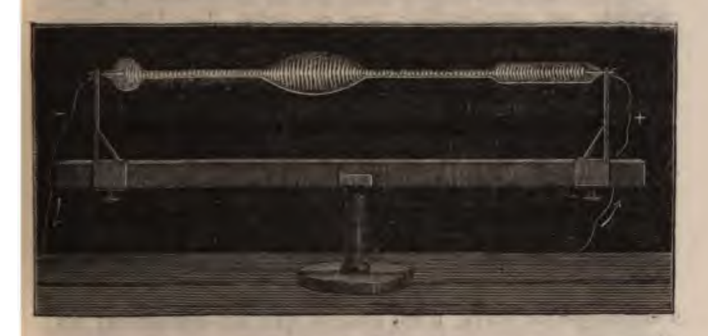


Fig. 24.

sible à l'œil l'accroissement de l'intensité de la vibration dans les sections étroites. Un tube de Geissler (fig. 24) ren-

[1] Voyez Lombardini, *De l'Origine, etc., Actes de l'Inst. lombard*, vol. VIII.

fermant un gaz extrêmement raréfié présente deux parties d'inégal diamètre, une grande et une capillaire. Pendant le passage du courant d'induction la partie capillaire devient extrêmement brillante, tandis que dans la partie élargie, on observe seulement une légère lueur phosphorescente, dont la couleur varie avec les substances contenues dans les tubes. Enfin de la Rive, étudiant la distribution de la chaleur au sein de ces tubes, a retrouvé les lois thermiques de la propagation du courant dans les fils; les deux phénomènes sont donc de même nature; et, pour ne citer qu'un exemple, un tube rempli d'hydrogène raréfié s'échauffe énormément pendant le passage du courant.

Ces faits nous autorisent à regarder le courant comme un véritable flux de matière traversant le conducteur, flux dont la vitesse croît à mesure que la section diminue; mais ils ne peuvent nous apprendre si le flux dont il s'agit ici est constitué par de la matière impondérable ou pondérable; sur ce point, les idées sont partagées : les uns font du courant un flux de matière impondérable, et alors ils expliquent la lumière et la chaleur voltaïques par le frottement, par le choc du courant éthéré contre les molécules matérielles; d'autres admettent au contraire un transport soit de la matière même des rhéophores, soit au moins de la matière dont les vibrations engendrent la lumière. Mais comme dans les tubes de Geissler la couleur de la lumière et son apparence spectrale varient avec la nature du gaz raréfié renfermé dans l'enveloppe de verre, il est évident que non-seulement les électrodes, mais aussi la matière qui existe entre les pointes terminales, exerce une action sur le phénomène. De plus on est porté à admettre cette action spéciale en voyant d'une part les tubes se recouvrir à l'intérieur de dépôts plus ou moins épais, et de l'autre les substances qu'on y renferme s'altérer peu à peu; cependant ces résultats,

malgré leur importance, n'excluent pas nécessairement l'intervention de l'éther.

De toutes façons les lois citées plus haut sont inconciliables avec l'hypothèse d'un simple mouvement vibratoire, analogue soit à celui qui, imprimé à la matière pesante, détermine en elle les *phénomènes* de chaleur, soit au mouvement lumineux qui traverse un milieu diaphane absorbant. On est donc forcé de reconnaître que, même en admettant que le courant se propage quelquefois par ondulations, celles-ci sont toujours constituées par un véritable flux et par un transport réel. Déjà dans le livre II nous avons esquissé une hypothèse utile à rappeler en ce moment. L'onde éthérée calorifique, avons-nous dit, lorsqu'elle dépasse les limites d'élasticité du milieu doit se rompre et se transformer en un véritable courant. De cette façon on comprend pourquoi la chaleur et le courant sont toujours en intime connexité mais en même temps on saisit parfaitement les caractères distinctifs de ces deux genres de mouvements.

La théorie, qui fait du mouvement électrique un mouvement vibratoire, ayant été défendue par des physiciens fort distingués, il est bon de montrer toute son insuffisance. Elle ne peut d'aucune façon expliquer comment le mouvement augmente à mesure que la section se rétrécit; ce fait ne se présentant dans aucun des mouvements vibratoires connus, qu'ils soient longitudinaux comme ceux du son, ou transversaux comme ceux de l'eau et de la lumière. Lorsque ces divers mouvements rencontrent un obstacle qui rétrécit le milieu où ils se produisent, ils se réfléchissent dans la masse du milieu, mais ils ne se pressent pas dans le pertuis ouvert devant eux, ce sont les fluides animés d'un mouvement de transport qui augmentent ainsi de vitesse en traversant des passages étroits. Les ondes longitudinales, les ondes de la mer par exemple, peuvent présenter une augmentation d'intensité lorsque, brisées à moitié, la pression qu'elles exer-

cent est plus grande dans un sens que dans un autre; mais, par ses conditions spéciales, ce cas se rapproche plutôt des mouvements de translation que des mouvements vibratoires; et nous verrons qu'il peut se rencontrer dans l'écoulement de l'électricité. De même, lorsqu'une barre est chauffée par une source calorifique, on ne voit pas que la température soit plus élevée dans les endroits où la barre est plus étroite. Il en est autrement quand l'échauffement est produit par l'électricité, puisque, comme nous venons de le rappeler, des fils très-fins placés dans le circuit d'un conducteur ordinaire peuvent être rougis et fondus pendant que les gros s'échauffent à peine. Ce fait à lui seul suffit pour montrer la grande différence qui sépare les deux phénomènes.

A la vérité, en étudiant les lois de la propagation de l'électricité dans les conducteurs d'une très-grande longueur, les formules obtenues sont semblables à celles de la propagation de la chaleur; mais 1° les formules sont comparables seulement par quelques points; 2° alors même qu'on se borne à déduire de ces formules les conséquences relatives à la tension, une remarque doit être faite, elles ont été établies tant pour la propagation électrique que pour la propagation calorifique en admettant comme principe fondamental que la communication de la force d'élément à élément se fait en raison de l'excès de la charge du premier sur celle du second. Elles sont donc applicables toutes les fois qu'il y a un excès de force, lequel peut résulter soit d'un accroissement de l'intensité du mouvement, soit d'une accumulation de matière. Par conséquent, alors qu'elles nous conduisent à des résultats identiques, cela ne nous apprend rien sur la nature de la force elle-même et ne nous autorise pas à regarder celle-ci comme un mouvement vibratoire, les calculs édifiés sur ces idées ne suffisant pas à vérifier les hypothèses qui leur servent de bases.

Il est impossible d'admettre que le mouvement vibratoire électrique élève la température des conducteurs, de même que la lumière échauffe les corps diaphanes en les traversant, car une telle idée est en opposition avec le fait du renforcement du mouvement à chaque rétrécissement de la section. De plus, s'il en est ainsi, l'absorption devant varier en progression géométrique quand la distance parcourue augmente en progression arithmétique, la température des divers points d'un fil devrait décroître en raison de leur distance à la source ; or ce résultat ne s'observe pas en général. En effet, si quelquefois, lors de la fermeture d'un courant, la température n'est point la même dans les différentes sections, cela ne se présente jamais le courant une fois établi. Du reste, les irrégularités du commencement sont faciles à expliquer dans l'hypothèse d'un transport réel de la matière.

Ainsi nous sommes conduits à accepter les idées communément reçues sur le courant et à le regarder comme un véritable flux de matière dans le fil conducteur. En effet tous les phénomènes qui accompagnent la propagation des courants trouvent leurs homologues dans ceux observés lors du passage d'un fluide dans un canal. Voici à ce sujet quelques exemples. L'expérience a montré que l'intensité I des courants est toujours en raison directe de la force électromotrice, ou (comme on l'appelle encore) de la tension électroscopique E, et en raison inverse des résistances intérieures R venant de la pile, et extérieures r appartenant au circuit : donc on a

$$I = \frac{E}{R+r}.$$

Les physiciens ont admis : 1° que la résistance extérieure croît en raison directe de la longueur du fil et en raison inverse de sa section ; or, quand on détermine les résistances éprouvées par un liquide coulant dans un tube,

on retrouve les mêmes éléments agissant de la même manière, avec la différence cependant que dans le cas des courants électriques la résistance est proportionnelle à toute la section, tandis que pour les liquides cette résistance varie seulement comme le périmètre de la section; différence qui s'explique facilement par la raison que le torrent électrique envahissant non-seulement la surface du conducteur, mais l'épaisseur entière de la masse, éprouve une résistance de la part de toutes les molécules. 2° La résistance n'est pas spécifiquement la même pour les diverses substances, et une différence de section dans l'une est souvent compensée dans une autre par un pouvoir conducteur plus grand, ainsi un fil de platine résiste onze fois plus, et un fil de fer sept fois plus qu'un fil de cuivre. Cette conductibilité plus ou moins grande permet d'obtenir des effets d'égale intensité avec des fils de diamètres inégaux; ainsi un courant capable de porter à l'incandescence un fil de cuivre très-fin mettra en ignition un fil de platine beaucoup plus gros, et tel courant qui échauffera faiblement un fil de cuivre ou d'argent fondra au contraire un fil de platine.

La chaleur engendrée dans les conducteurs par le courant serait donc le résultat du frottement et de l'agitation déterminée par le flux électrique faisant irruption au milieu des molécules, auquel cas il est indifférent que le courant soit un flux de matière pondérable très-raréfiée ou un flux d'éther. La somme des oscillations accomplies par les molécules est tellement petite que l'on peut considérer la vitesse communiquée comme simplement proportionnelle à la vitesse du courant, dès lors la température qui est le travail effectué sera proportionnelle au carré de cette même vitesse, conclusion conforme aux résultats obtenus par M. Marié Davy [1].

[1] Voyez *Recherches théoriques*, etc., Marié Davy. Paris, 1862, et Thomson, *Philosoph. transact.*, 1856, page 650, note.

On peut acquérir des notions très-utiles sur la nature du flux électrique, en étudiant les phénomènes lumineux qui se produisent lors de la disjonction des conducteurs interpolaires d'un appareil électrique. Ces phénomènes étant extrêmement variés, essayons de les ramener à quelques types principaux.

1° Quand une large interruption est établie dans un arc métallique dont les extrémités sont en relation d'une part avec les coussins et de l'autre avec les conducteurs d'une machine électrique, on obtient la forme la plus connue de la décharge lumineuse; l'extrémité positive présente une aigrette brillante et l'extrémité négative un point lumineux figurant une étoile. Ces lueurs, examinées par réflexion sur un miroir tournant, ne se montrent pas continues, mais formées d'étincelles très-petites. Dans un milieu extrêmement rare, tel que celui du récipient d'une bonne machine pneumatique ou des tubes de Geissler, la décharge est stratifiée, qu'elle soit produite par un courant volta-électrique ou par un courant d'induction. Enfin, de même avec une bouteille de Leyde la décharge, au lieu d'être simple, est composée d'une série de décharges partielles se succédant sans interruption, de telle sorte que l'on pourrait croire à un mouvement ondulatoire discontinu.

L'incandescence des molécules durant ces phénomènes est causée par l'agitation considérable de la matière, agitation que l'on observe constamment lorsqu'un flux se produit par flots successifs; exemple, la fumée sortant d'une cheminée par bouffées successives, l'eau elle-même lorsque, soumise à de très-fortes pressions, elle se meut par ondes successives comme l'ont montré les observations faites sur les tubes de la conduite d'Alatri, dans lesquels l'eau coule sous une pression de 135 mètres. Or, de même que le courant succède toujours à la tension électrique, ainsi un liquide, une veine liquide succède à

une pression hydrostatique : les conditions sont donc parfaitement comparables.

Pendant longtemps on ne comprit rien à la façon dont s'accomplissait la décharge. Elle semblait à première vue une explosion éclatant à la fois sur les deux extrémités des rhéophores, et on la supposait produite par deux fluides en mouvement, le positif et le négatif. Ces déductions étaient erronées, car en réalité l'étude de l'étincelle ne prouve rien autre, si ce n'est que la condensation et l'ébranlement de la matière pesante acquiert une plus grande violence dans les parties voisines des extrémités entre lesquelles la décharge jaillit. On peut voir sur les figures de Feddersen[1] que l'étincelle est compacte à ses deux extrémités et plus large par suite, moins brillante en son milieu. La formation de l'étoile lumineuse au pôle négatif s'explique sans qu'il soit nécessaire de supposer l'écoulement d'un fluide spécial par cette extrémité, la lumière et la chaleur qui s'y produisent peuvent en effet provenir de l'agitation suscitée par le flux électrique positif entrant dans le conducteur par l'extrémité négative.

Cependant, afin de prouver qu'un fluide sortait à la fois de deux pôles, on citait l'expérience suivante : une décharge électrique étant lancée à travers plusieurs feuilles de papier, on voit les bords du papier renversés les uns vers le pôle positif, les autres vers le pôle négatif. Ces résultats ne prouvent rien en faveur de l'existence d'un fluide négatif, car ils sont dus à l'expansion de l'air ou des substances vaporisées qui se sont dilatées dans tous les sens. On a observé qu'une plaque de matière molle, percée par un boulet, présente des bords renversés dans le sens opposé à la direction suivie par le boulet en pénétrant dans la masse. Nous avons vu souvent dans l'expé-

[1] Gassiot, *Proceedings R. soc.*, London, vol. XII, p. 338. Feddersen, *Ann. chim. et physique*, octobre 1863.

rience du crève-vessie, les bords de la membrane renversés en sens inverse du mouvement de l'air qui rentre dans le manchon de verre ; et nous avons encore pu constater des phénomènes de ce genre sur les tubes de cuivre d'une machine hydraulique aspirante qui furent brisés par l'effet de la pression atmosphérique. Ainsi le renversement symétrique qu'on observe dans les feuilles traversées par l'étincelle ne prouve pas nécessairement l'existence du fluide négatif.

2° Avec les courants électriques on produit des effets semblables à ceux des décharges de Leyde, seulement il y a des différences dans l'intensité et la continuité. Aussitôt que dans un circuit on établit une solution de continuité, les deux extrémités du fil manifestent une tension électroscopique, mais il n'y a pas élévation de température. Cette tension est si faible qu'elle ne peut vaincre la résistance d'une mince couche d'air interposée; toutefois Gassiot employant des piles de 6000 à 3000 couples, l'étincelle jaillit spontanément malgré un écartement très-appréciable des fils conjonctifs. Lorsqu'on opère sur les piles ordinaires, on peut suppléer à la trop faible tension initiale par divers moyens ; ainsi on obtient l'étincelle sans amener les rhéophores en contact, en les faisant traverser préalablement par la décharge d'un condensateur ordinaire, ou bien encore en plaçant à une distance convenable l'une de l'autre les pointes terminales du fil conducteur au milieu d'une flamme. Une fois que le flux électrique a franchi l'intervalle des deux pointes, il continue à passer, parce que le milieu interpolaire est rendu conducteur par la dilatation graduelle que lui fait éprouver l'élévation de température résultant du passage du courant. Il est reconnu en effet que les milieux très-dilatés laissent passer facilement les décharges, alors même que la distance des extrémités polaires est assez considérable, et, pour ne citer qu'un seul exemple, dans les expériences

sur la lumière électrique, on s'est assuré que la résistance de l'espace compris entre les charbons égalait environ la moitié de la résistance du circuit tout entier, valeur de beaucoup inférieure à celle d'une égale couche d'air dans les conditions ordinaires. En outre, l'arc lumineux se modifie incessamment, car il suit les mutations du courant, à la façon d'un rhéostat variable réglant le mouvement de la pile, de façon à ce que la même quantité d'électricité traverse constamment les charbons, mais en produisant une moindre lumière et un arc voltaïque plus court lorsque l'intensité de la source électrique diminue [1].

3° Pendant la décharge obscure et silencieuse à travers des liquides séparés par des diaphragmes poreux, il s'accomplit un transport des liquides du pôle positif au pôle négatif ; de même dans la décharge lumineuse il y a constamment transport de matière d'un pôle à l'autre, mais avec une prédominance marquée en faveur du mouvement positif. En soumettant l'étincelle voltaïque à l'analyse spectroscopique, on trouve qu'elle fournit toujours les mêmes résultats, quelle que soit la nature du métal employé comme pôle négatif, tandis qu'il n'en est pas de même lorsque le pôle positif vient à changer ; donc le transport et la volatilisation des substances s'effectuent surtout au pôle positif. A ce pôle, non-seulement la lumière est plus intense, mais le maximum d'éclat se produit dans la direction du courant ; semblable chose arrive pour le son, il présente une plus grande intensité dans la direction de l'explosion. Toujours est-il qu'on observe quelquefois un transport dans le sens négatif, soit dans les décompositions chimiques, soit dans les expériences d'incandescence, mais ces phénomènes peu-

[1] Voyez dans *Nuovo Cimento*, vol. IV, notre ***Mémoire sur la lumière électrique***, page 49.

vent être rapportés à une volatilisation de la substance opérée par le courant positif lui-même. Il ne faut pas oublier de signaler parmi les phénomènes propres à nous éclairer sur la nature du flux électrique l'observation suivante : les particules transportées conservent la forme des corps dont elles ont été détachées, et en elles dessinent les contours sur la surface des conducteurs qu'elles traversent. Semblable chose arrive aux veines fluides lancées avec une grande vitesse contre une paroi résistante. Enfin chacun connaît les empreintes laissées par la foudre. Fusinieri, qui a étudié tous ces faits avec grand soin, croyait avoir démontré le transport de la matière pondérable à des distances sensibles suivant des lignes obliques, même à travers les métaux, d'où il avait conclu que l'étincelle n'est pas exclusivement formée par l'éther en vibration, mais que la substance des extrémités polaires amenée à une véritable incandescence en fait aussi partie constituante.

4° La décharge de la pile n'est pas rigoureusement continue. Dans les tubes de Geissler la lumière est stratifiée. Gassiot, avec une pile à eau de 3000 couples, a obtenu une lumière sensiblement continue lorsqu'il n'y avait aucune résistance intercalée dans le circuit, mais en interposant une couche d'eau, aussitôt les stratifications apparaissaient. Ajoutons que même dans les cas où l'étincelle électrique nous paraît continue à la simple vue, on peut cependant s'assurer du contraire à l'aide d'un miroir tournant. Feddersen a constaté sur les batteries de Leyde que si la résistance diminue, le trait lumineux devient continu, du moins en apparence, parce qu'alors les lignes de décharge se multiplient de telle sorte que la discontinuité des explosions partielles successives se compensant mutuellement, l'ensemble paraît continu ; la même observation s'applique également aux piles. D'après ce physicien, au commencement de la décharge jaillit une étin-

celle très-étroite qui établit la continuité du circuit, ensuite apparaissent les pulsations. Ces phénomènes se modifient beaucoup dans le cas des courants induits, comme nous le verrons plus tard.

Tous les faits précédents prouvent que le courant procède par ondulations analogues à celles qui se forment dans toutes les veines fluides lancées avec force ou dans les courants liquides lorsque, rencontrant un obstacle, ils produisent pour le vaincre des poussées qui se superposent. De cette façon l'explication du bruit de la décharge devient facile; ainsi examinons l'arc voltaïque : à mesure que les charbons interpolaires se rapprochent, ils font entendre un sifflement plus aigu, et en même temps la lumière devient plus riche en ondes courtes et fluorescentes, preuves évidentes d'une certaine discontinuité non-seulement dans l'air dont la vibration produit le son, mais aussi dans les pulsations qui donnent naissance à la lumière.

Dans les milieux raréfiés, en expérimentant à l'aide des courants d'induction, on voit le pôle négatif s'échauffer plus fortement que le pôle positif, bien qu'il reste obscur[1]. Mais ces phénomènes ne sont pas constants, et comme il se surajoute ici des phénomènes d'induction, ils appartiennent à des cas plus complexes.

En résumé, du pôle positif s'échappent les particules entraînées par le courant, et c'est lui qui présente l'éclat le plus intense et la plus grande longueur du jet lumineux ; au pôle négatif, on constate toujours une moindre intensité et une diffusion latérale très-marquée. Ces conclusions sont seulement valables pour le cas des courants volta-électriques, en dehors de tout phénomène d'induction. Donc le *courant électrique est un flux qui réellement se dirige du pôle positif au pôle négatif.*

Revenons un instant sur un fait déjà signalé au premier

[1] De la Rive, *Mondes*, 1863, page 275.

chapitre. Gassiot a constaté, avons-nous dit, qu'il est impossible de faire passer la décharge électrique à travers le vide absolu. Mais pour obtenir ce vide complet, les précautions les plus délicates sont nécessaires; non-seulement il ne faut laisser dans les récipients la moindre trace de substances gazeuses, il faut également renoncer aux mastics ordinaires. Plusieurs fois de suite on remplit des tubes en verre avec de l'acide carbonique; puis, après avoir épuisé ce gaz, autant que possible à l'aide de la machine pneumatique, on absorbe les dernières quantités restantes avec la potasse; or, si les tubes éprouvent une très-faible élévation de température, immédiatement courant et lumière les traversent, parce que, sous l'influence de la chaleur, les matières solides ont dégagé des traces de vapeurs. Cette très-remarquable expérience nous apprend que là où le courant passe la matière pesante doit exister; mais en conclure que l'élément impondérable, tel que nous l'avons défini, ne prend aucune part à la transmission du courant, c'est assurément aller au delà des faits qui ne prouvent en rien l'impossibilité d'une telle intervention. Du reste, admettons que les expériences faites jusqu'ici dans le but de constater le pouvoir isolant du vide soient parfaitement concluantes; cela montrerait seulement que le vide ne transmet pas les mouvements longitudinaux tels qu'on les conçoit dans le courant, et qu'il transmet au contraire les mouvements transversaux de la lumière. En cela, le vide ne serait pas différent des autres corps transparents. Par contre, dans l'intérieur des corps pondérables et spécialement des métaux, l'éther serait susceptible à un degré plus ou moins prononcé de vibrer longitudinalement. Voilà pourquoi la présence de la matière est une condition nécessaire au passage du courant, reste à savoir si elle est suffisante, et si l'éther ne prend pas une certaine part au phénomène. Enfin il reste toujours à expliquer quelle est la force assez puissante

pour lancer un flux de matière avec une violence capable de surmonter tous les obstacles, et à montrer comment, si le courant est exclusivement constitué par la matière, on peut concevoir le développement de l'énorme vitesse dont il est animé. La force répulsive, mise en jeu dans ces circonstances, surpasse de beaucoup en énergie celle qui produit l'évaporation et la sublimation des solides, car les phénomènes de ce genre sont fort différents des manifestations électriques. Fusinieri lui-même reconnaissait la dissemblance des deux agents que nous comparons, puisqu'il nommait le premier : « calorique natif. »

En étudiant l'origine du courant, nous verrons clairement pour quelle part la matière pesante et l'éther entrent chacune dans son développement[1].

Comme conclusion de ce chapitre, nous dirons que le courant est certainement un flux de matière circulant dans le fil rhéophore du pôle positif au pôle négatif. Mais est-ce un flux de matière pondérable, ou d'éther? Nous n'avons pas encore répondu à cette question, et pour le faire sans incertitude, il nous faut recourir à un autre genre d'observations.

[1] Voir Fusinieri, *Annales des sciences du royaume lombard-vénitien*, tome III, page 38, etc. — Ce physicien, le premier, eut le courage de se déclarer contre les impondérables et les forces métaphysiques, ses travaux précédèrent donc de plusieurs années ceux des physiciens modernes. Son langage un peu trop violent lui suscita de nombreux adversaires, mais il témoigne toujours d'une conviction profonde, et nous devons ajouter qu'un grand nombre de ses opinions ont été confirmées par les recherches ultérieures. De son temps, la vraie théorie de la lumière n'était pas faite encore; aussi tomba-t-il dans des exagérations malheureuses. Néanmoins son nom mérite d'être compté parmi ceux des fondateurs des théories nouvelles.

CHAPITRE IV

DE L'ORIGINE DU COURANT DANS LA PILE.

Nous pouvons regarder une pile dont le circuit est fermé comme une machine en activité, dans laquelle, ainsi que dans toute machine arrivée à l'état de mouvement uniforme, il s'établit un équilibre complet entre le travail exécuté par la puissance motrice, en agissant sur les organes récepteurs de la machine, et le travail passif, ou la résistance surmontée par l'outil. Le premier travail s'accomplit dans le rhéomoteur lui-même, le second dans le circuit interpolaire. L'altération chimique des substances nécessaires à la construction de l'électromoteur est la véritable source du travail actif; autrefois cette activité était attribuée au contact des éléments, et il se peut que cette condition soit favorable, et même nécessaire à la circulation de la matière, mais il ne saurait être principe de force vive, car quelque chose naîtrait du néant. Le travail de la pile, soit actif, soit passif, peut être thermique, mécanique ou chimique : dans le présent chapitre, nous traiterons de ce dernier.

Aucun des corps composés de la nature, convenablement traité, ne peut résister à l'action décomposante du courant; aussi la chimie est-elle en grande partie redevable à la pile des nombreuses découvertes qui depuis ces dernières années lui ont fait subir une rénovation complète. Si les substances à décomposer par le courant voltaïque sont liquides, on les soumet directement à l'action de la pile, et, si elles sont solides, on les dissout ordinairement dans un liquide non isolant, l'eau par exemple.

On doit étudier l'action chimique d'une pile dans deux conditions parfaitement distinctes, ou bien : 1° elle s'accomplit sur le trajet extérieur du courant, ou bien, 2° au sein de l'élément voltaïque lui-même.

Commençons par l'action extérieure. La puissance électrolytique d'un courant se mesure en déterminant la quantité des éléments séparés pendant la décomposition des corps; ainsi l'évaluation des volumes d'oxygène et d'hydrogène fournis par la décomposition électrochimique de l'eau permet souvent d'établir une comparaison entre les intensités chimiques des divers courants. Dans le cas où les éléments isolés ne sont pas gazeux, il suffit d'estimer le poids de l'un d'entre eux; par exemple, le poids du métal déposé pendant la réduction voltaïque du sulfate de cuivre. Mais lorsqu'on a recours à ce mode de mensuration, les auteurs recommandent, avec raison, d'user des précautions les plus minutieuses.

L'expérience a fourni sur les actions électro-chimiques quelques données générales, parmi lesquelles nous citerons la loi suivante, à cause de sa grande importance :

La puissance chimique d'un courant est proportionnelle à son intensité magnétique mesurée avec la boussole, et dans tous les points du circuit elle a une valeur constante. Cette loi établit entre deux actions électriques différentes une relation, telle que l'une peut être substituée à l'autre. Les deux phénomènes sont parfaitement parallèles; ainsi en partageant un courant entre deux galvanomètres, on observe des déviations, dont la somme est égale à l'angle d'écart mesurant l'intensité du courant total ; de même, en partageant un courant entre deux rhéomètres chimiques, la somme des éléments séparés représente la quantité obtenue dans un seul appareil traversé par le courant tout entier, abstraction faite bien entendu des résistances et autres influences secondaires.

Lorsqu'on évalue l'intensité de l'action chimique, il est nécessaire de tenir compte du temps : ainsi, deux courants sont égaux lorsqu'ils décomposent des quantités égales d'une même substance ; dans le même temps un courant est double d'un autre, si dans un temps donné il décompose une quantité double de substance, etc. La résistance, ou conductibilité, du milieu au sein duquel l'action électrolytique s'accomplit, n'exerce d'autre influence que d'augmenter ou de diminuer la quantité totale d'électricité mise en circulation, comme on peut s'en assurer à l'aide de la boussole. L'intensité de l'action chimique est constante dans toutes les sections du circuit ; elle reste aussi la même dans les points pris à l'intérieur de la pile elle-même, et cela indépendamment du travail qui peut s'accomplir dans les autres parties ; par conséquent, les choses se passent encore ici de même que dans les actions électro-dynamiques.

Avant d'aller plus loin, disons quelques mots de l'action chimique à l'intérieur de la pile, puis nous reviendrons à l'action extérieure et nous chercherons les relations entre les deux genres d'effets.

La disposition des couples électro-chimiques varie à l'infini, car on peut les former avec des métaux et des liquides fort différents les uns des autres, mais tous les couples ne se prêtent pas avec la même facilité aux recherches théoriques, parce que dans un grand nombre d'éléments se produisent des réactions secondaires qui compliquent la régularité de l'effet principal. En faisant abstraction de ces influences perturbatrices, et en opérant sur des substances convenablement choisies, on a trouvé que *l'action décomposante d'un courant est la même dans chacune des cellules de la pile et dans les diverses parties des rhéophores ;* si bien que le volume d'hydrogène mis en liberté dans un élément est égal à celui recueilli dans un voltamètre traversé par le courant de

cet élément. On obtient des résultats parfaitement nets à l'aide d'un couple formé soit avec du zinc distillé, ou tout au moins amalgamé, et de l'acide sulfurique, soit avec du platine platiné et le même acide. Dans plusieurs dispositions voltaïques cette loi ne se vérifie pas, on attribue les exceptions à des actions locales.

Supposant nulle toute espèce d'actions locales et la surface des couples égale pour tous les éléments d'une pile, il résulte de la loi énoncée ci-dessus, que la somme d'électricité mise en mouvement dans une pile est proportionnelle au nombre des éléments; mais à mesure que les cellules deviennnent plus nombreuses, les résistances présentées par les couches liquides de ces mêmes cellules, croissent d'une égale quantité, si bien que la quantité du courant mis en circulation est indépendante du nombre des éléments. Afin de comprendre comment plusieurs couples, sans accroître le courant, permettent d'obtenir certains effets impossibles à réaliser avec un seul, il est bon d'examiner l'état virtuel du courant et de définir ce que l'on entend par force électromotrice.

Lorsque, dans un élément de pile électro-chimique les métaux étant plongés dans le liquide destiné à les recevoir, on ne réunit pas les électrodes, les plaques ne sont plus à l'état naturel et manifestent une certaine tension électroscopique. Volta et les physiciens de son époque se contentèrent d'étudier la pile dans ces conditions, et la valeur de cette tension électroscopique constitue, à proprement dire, ce que l'on appelle depuis lors la force électromotrice. Son intensité varie avec la combinaison adoptée; ainsi représentant par 1000 celle du couple Daniell, celle du couple Bunsen sera 1500 et ainsi des autres[1].

[1] Les recherches faites sur ce point sont nombreuses, nous citons ici les nombres qui résultent d'expériences personnelles faites en 1856. *V. N. Cimento*, vol. IV. Ces valeurs varient avec la force des acides;

L'intensité effective d'un couple, c'est-à-dire la déviation galvanométrique, ou la quantité de décomposition électrochimique qu'il peut produire, est directement proportionnelle à cette tension, et en raison inverse de la résistance intérieure, elle est donc représentée par

$$I = \frac{E}{R}.$$

Si dans l'intérieur de l'élément on intercale une résistance étrangère à cet élément, par exemple un fil ou un voltamètre d'une *valeur réduite* r [1], l'intensité deviendra

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

On voit par là que si on multiplie les couples alors que r est nul, I ne variera pas ; car

$$\frac{n . E}{n . R} = \frac{E}{R}.$$

Mais au contraire la multiplicité des couples aura un grand avantage dans le cas d'une résistance additionnelle ; car la formule de l'intensité sera

$$I = \frac{n E}{n R + r}.$$

du reste les nombres trouvés par nous diffèrent peu de ceux obtenus par les autres

[1] Par valeur *réduite* on entend celle qui est exprimée à l'aide de l'unité de résistance adoptée. Dans les déterminations de ce genre, il ne suffit pas de tenir compte de la longueur des fils métalliques, mais encore de leur température, ainsi que nous l'avons indiqué dans un travail ayant pour titre : *On Electrical Rheometry*, publié dans les *Smithsonian Contributions*, de 1849.

La tension peut se déterminer dynamiquement soit avec la formule en intercalant une résistance r, soit à l'aide de l'électroscope.

La quantité E paraît être en réalité la mesure de l'expansion électrique du mouvement. (Voir *Mémoire sur la lumière électrique*, page 69.)

et alors la valeur de r exercera une influence d'autant moindre que le nombre n sera plus grand.

La tension électroscopique d'une pile est l'élement essentiel de sa puissance, et la pile présente sur toutes les sources électriques connues l'avantage de pouvoir reconstituer sa tension en un intervalle de temps très-court. Cependant, sous ce rapport, sa puissance n'est pas infinie; tous ceux qui se sont occupés de télégraphie le savent parfaitement. Ainsi une pile Bunsen recouvre sa tension plus rapidement qu'une pile de Daniell, et celle-ci plus vite qu'une pile à eau simple.

Il importe pour l'objet du présent travail de déterminer au juste en quoi la tension électroscopique d'une pile se différencie du courant né de la même pile.

Évidemment, entre ces deux conditions électriques, le rapport est en tout comparable à celui que l'on reconnaît en hydraulique entre une pression hydrostatique et un flux; car la tension d'une pile cesse aussitôt que le courant commence. Le rapprochement que nous faisons ici d'une part entre la tension électrique et les pressions hydrostatiques, et d'autre part entre l'écoulement des fluides pesants et le *mouvement* qui constitue le courant électrique, nous oblige à bien déterminer quelle signification il faut donner aux mots tension et pression.

Généralement on entend par tension un mouvement virtuel destiné à produire un certain effet qu'il ne parvient pas à accomplir par le fait d'une résistance antagoniste. Telle est la définition communément acceptée ; par conséquent il est aisé de voir que le mot tension n'est autre qu'une de ces nombreuses expressions métaphoriques qui procèdent du sentiment intime de l'activité et de la personnalité humaine. Souvent, en effet, il nous arrive de faire un effort en vue de réaliser un certain effet et nous n'obtenons pas le résultat désiré , néanmoins nous avons parfaitement conscience de notre tension musculaire. Or,

il ne se passe rien de semblable dans les corps inanimés.

En analysant soigneusement les circonstances dans lesquelles nous admettons une tension ou une pression, nous n'y trouvons pas autre chose qu'un mouvement ou une disposition au mouvement, et par disposition au mouvement il faut entendre un état d'inertie, une sorte d'état passif de la matière qui ne constitue nullement une véritable tendance, si nous donnons à ce mot sa signification habituelle. Là où il y a tendance, on trouve toujours un mouvement que nous disons virtuel ou potentiel. Or le virtuel, le potentiel sont des idées abstraites, de pures conceptions subjectives, ne correspondant à aucune réalité dans la nature. L'observation nous apprend une seule chose, c'est que les circonstances où nous admettons un mouvement virtuel supposent toujours un mouvement véritablement actuel, mais qui se différencie de celui que nous appelons ainsi communément, parce qu'il n'y a pas alors déplacement appréciable à nos sens d'une masse, tandis qu'au contraire, dans le mouvement dit actuel il y a translation apparente d'une masse. Lorsqu'on n'observe pas le transport d'une masse, il y a en général ou un mouvement intérieur de vibration dans le corps lui-même, ou bien un autre corps le pousse en vertu d'un pareil mouvement, mais le mouvement de déplacement est empêché par une cause antagoniste : celle-ci venant à cesser, aussitôt la première traduit son effet d'une façon plus ou moins apparente. Toute pression ou tension suppose deux forces contraires en présence, et les forces se résolvent en mouvement de la matière. Ce mouvement restera oscillation ou vibration dans l'état de tension et deviendra translation aussitôt que l'une des forces antagonistes cessera son action. Ainsi dans une chaudière à vapeur fermée il y a tension ; cette tension n'est que le mouvement vibratoire des gaz : que la soupape soit soulevée ou que les parois éclatent, et la vibration devient

aussitôt projection. On a coutume de dire qu'alors le mouvement virtuel ou potentiel se traduit comme mouvement actuel; mais on voit qu'il y avait déjà un mouvement réel et actuel quand la chaudière était fermée.

Cette remarque peut s'appliquer à tous ces cas de la nature. Ainsi l'étude de la chaleur nous a prouvé que toutes les molécules des corps sont dans une continuelle agitation; par l'effet de leur réaction réciproque, les molécules devraient donc être projetées au loin et concevoir un mouvement de translation, mais elles en sont empêchées par des actions contraires, lesquelles sont, par exemple, la gravité d'une masse ou le poids, la cohésion moléculaire, etc. Nous ignorons complétement le mécanisme de ces actions, au moins pour la plupart, et de là vient la difficulté de se rendre raison des phénomènes d'une manière satisfaisante. Toutefois ces *forces résistantes* doivent nécessairement se résoudre en un mouvement puisqu'elles sont capables d'équilibrer un mouvement. La manière de voir que nous exposons actuellement est générale et fondamentale, de plus elle est une conséquence nécessaire de la théorie mécanique de la chaleur. A la vérité elle renverse toutes les idées reçues jusqu'à ce jour, et nous oblige à donner un sens précis à une multitude de locutions purement conventionnelles qui ont cours en mécanique rationnelle. Une pareille considération ne doit pas nous arrêter; avec le temps on reconnaitra certainement combien il est nécessaire dans l'explication des phénomènes d'employer les mots tension ou pression avec la signification précise que nous leur avons assignée. Non que nous voulions réformer sur ce point le langage scientifique; car pour la rapidité du discours certaines expressions conventionnelles méritent d'être conservées; mais il faut bien se garder de voir dans ces mots autre chose que

des locutions commodes pour éviter la confusion que la multitude des paroles apporte.

Donc tous les corps à l'état de tension présentent un mouvement de vibration duquel dérive une sorte d'équilibre dynamique, c'est-à-dire d'équilibre entre actions contraires et égales. Le rôle du physicien consiste à reconnaître dans chaque cas particulier la nature des causes sollicitantes et à les réduire à des modalités de mouvement.

Pour rendre notre pensée plus claire, nous aurons recours à une comparaison. Peut-être présente-elle l'inconvénient d'être choisie hors du sujet et d'en donner une idée un peu vague ; néanmoins nous la croyons utile. Considérons deux animaux qui luttent ensemble : si leurs efforts s'entre-détruisent exactement, aucun des deux ne change de position. Or cet état d'équilibre est fort différent de celui que présenteraient ces mêmes animaux s'ils étaient simplement appuyés l'un contre l'autre; à cela nul ne se méprendra. Les fortes saillies que dessinent leurs muscles, l'exagération de leur chaleur naturelle, la sueur qui inonde leur corps et un grand nombre d'autres particularités montrent clairement que dans l'organisme de chacun des combattants il se produit un violent travail. Cependant une personne qui ne donnerait nulle attention à toutes ces manifestations, pourrait croire les deux adversaires en repos. Que si l'un des animaux ne soutient pas son travail intérieur, immédiatement l'autre prend l'avantage et lui fait perdre la position dans laquelle il se maintenait. Ainsi le mouvement de tension se transforme en translation aussitôt que le travail de l'un surpasse celui de l'autre.

Quittons maintenant les généralités et appliquons ces idées au cas particulier des phénomènes électriques. En examinant une pile dont les rhéophores ne sont pas réunis, nous voyons le mouvement moléculaire qui se dégage

dans l'intérieur de l'électromoteur au sein duquel il prend une direction déterminée, être arrêté au niveau de l'interruption du circuit : d'où tension aux deux extrémités polaires. Cette tension statique est nécessairement accompagnée d'un mouvement : il y a donc condensation ou raréfaction d'éther et, de plus, une vibration comme dans la chaleur ou l'action mécanique chimique d'où la tension dérive. Le mouvement vibratoire exagéré qui envahit les deux pointes terminales ne pouvant revenir en arrière (au moins dans sa totalité), trouble le milieu ambiant, lequel ne peut rester neutre et doit être changé dans sa manière d'être par cette exagération de la vibration moléculaire. La modification du milieu se manifeste par les phénomènes que nous observons dans l'espace affecté par la tension électrique et qui consistent en attractions et en répulsions.

Lorsque cette vibration effective atteint une intensité suffisante, elle devient capable de se frayer un passage à travers le milieu résistant et quand elle y a réussi, alors l'état de tension cesse aussitôt complétement et il se développe en même temps un mouvement particulier de transport qui est le courant.

Tel est le seul moyen rationnel de donner de la tension électrique une explication conforme à la théorie des phénomènes calorifiques, avec lesquels les effets de tension présentent une étroite analogie et de nombreux points de contact. Après que nous aurons examiné soigneusement le mode d'action d'une pile dans ses moindres particularités, nous reconnaîtrons encore mieux qu'il n'est pas possible de comprendre les choses autrement, car nous verrons que la tension statique de la pile est effectivement proportionnelle aux résistances que le courant doit surmonter dans son trajet.

Nous ne dissimulons pas que jusqu'ici on a éprouvé une difficulté réelle d'abord à se faire une idée nette du change-

ment qui s'opère dans la condition du milieu soumis à l'influence des corps électrisés, ensuite à concevoir en quoi consistent les états électriques particuliers que l'on distingue en appelant l'un positif, l'autre négatif; enfin il n'est pas facile de déterminer comment s'effectue le mouvement de translation électrique appelé courant. Sur tous ces points la lumière ne pourra se faire que lorsqu'on aura étudié et discuté l'ensemble des phénomènes électriques connus, en se plaçant au point de vue nouveau que nous venons d'indiquer ici, le seul qui permette de les interpréter mécaniquement.

Poursuivons donc notre tâche avec persévérance et sans nous laisser distraire par des théories prématurées; mais aussi sans renoncer à aucune des idées en possession desquelles nous ont mis nos recherches précédentes.

Considérons, pour plus de simplicité, comme sujet de démonstration une disposition exempte autant que possible d'actions secondaires, une pile de Smée, par exemple, faite avec du platine platiné et du zinc amalgamé; nous constatons l'existence d'une forte tension aux deux pôles, avant l'instant où ils sont réunis à l'aide d'un conducteur; de plus, les tensions polaires sont d'un signe différent. Assurément cette tension électrique permanente sur un assemblage de corps conducteurs, tels que ceux employés à la construction d'une pile, est un phénomène singulier et tout à fait différent de ceux qui nous sont présentés par l'électricité statique. En effet, l'équilibre de tension pourrait se rétablir facilement à travers la pile elle-même, formée toute entière de substances conductrices, et cependant ce retour n'existe pas. Les premiers physiciens avaient raison de s'étonner en voyant les deux modalités électriques opposées coexister aux extrémités d'un même conducteur. Aussitôt le circuit fermé, la tension disparaît et la circulation électrique commence; de

plus on peut régler l'intensité du mouvement circulatoire en donnant au fil conjonctif une longueur plus ou moins grande, à peu près comme on règle le flux d'un liquide en le dirigeant à travers des tubes de longueur et de résistance différentes.

Un tel fait donne lieu à des remarques importantes au point de vue théorique: 1° La tension électrostatique des plaques avant la fermeture du circuit nous montre que déjà, à ce moment, l'action électrique consiste dans une condition de la matière qui a quitté son état d'équilibre, et qui ne peut y rentrer que par l'action chimique elle-même, celle-ci restant incomplète pour ainsi dire, et exigeant, pour continuer ses effets, que l'on établisse une communication polaire à l'aide d'un arc conducteur. 2° La tension électrostatique dépendant de la nature de l'élément négatif du couple (cuivre, platine, charbon, etc.), nous devons en conclure que ce dernier exerce une certaine influence et que son action n'est pas exclusivement celle d'un simple conducteur comme le soutiennent certains physiciens. Produit-il une action chimique contraire, ou bien agit-il d'une autre manière? On l'ignore, mais assurément il joue un certain rôle. 3° S'il est possible de graduer le courant en faisant varier la longueur du fil conjonctif, on voit qu'il ne peut se produire dans le liquide intérieur d'une pile une action supérieure à celle que permet la résistance du fil lui-même; l'effet maximum serait donc obtenu avec un fil extrêmement court ou mieux encore nul, c'est-à-dire en mettant les éléments en contact immédiat molécule à molécule, et c'est là précisément les conditions des molécules matérielles pendant une combinaison chimique. Aussi n'est-ce pas sans raison que Faraday a défini le courant *une action chimique en circulation*, et de plus, d'après nous, l'action voltaïque montre sur une vaste échelle, et dans des limites accessibles aux mesures, la série des phénomènes qui s'accomplissent au sein des corps hétéro-

gènes mis en présence au moment où ils entrent en combinaison.

Ainsi la détermination de la nature et de l'origine du courant électrique est ramenée à un problème chimique; néanmoins il est bon de dire, que relativement au courant l'action chimique *latius patet*. En effet, dans certaines combinaisons entre corps matériels, l'action chimique est à la vérité transmise tout entière par l'arc conducteur, et par suite elle ne peut avoir lieu en l'absence de cet arc ; mais, dans d'autres circonstances, les choses se passent tout autrement, ainsi la plus grande partie de l'électricité développée peut être mesurée, dans telle autre au contraire cette mesure est impossible[1]. Les réactions qui s'accomplissent dans la pile doivent être classées parmi celles qui ne peuvent avoir lieu en l'absence d'une substance auxiliaire, laquelle, pour son propre compte, ne contracte aucune combinaison; telle est la fonction de la lame métallique négative dans un élément voltaïque.

L'ensemble des faits réunis par les physiciens modernes nous autorise à conclure qu'il existe dans la pile une cause de mouvement intérieur continu, mais la même action ne permet pas le rétablissement complet de l'équilibre par les liquides de la pile, et il est nécessaire de faire intervenir une seconde substance conductrice dont

[1] On trouvera une série d'expériences à l'appui de cette assertion dans le mémoire déjà cité sur la lumière électrique. (Voy. t. IV, p. 64 du *N. Cimento.*) Avec un élément de Bunsen à faible résistance additionnelle, la différence entre le travail à l'extérieur et la pile à l'intérieur est proportionnellement plus grande que dans une pile présentant une résistance interférente plus considérable. La différence ne peut être attribuée aux pertes, car celles-ci ayant été mesurées avec grand soin, se trouvaient être de beaucoup inférieures à la différence constatée. Despretz a reconnu que dans toutes les piles, même dans celle de Daniell, le travail extérieur n'était jamais égal au travail intérieur.

la communication avec les premiers soit assurée, de cette façon l'action chimique peut se continuer. En un mot on ne peut supprimer l'arc conducteur qui est un véritable régulateur de l'énergie chimique en permettant le passage d'une quantité définie d'électricité d'un élément voltaïque à l'autre.

Pour expliquer ces faits trois hypothèses seulement sont possibles : 1° L'action chimique détermine vraisemblablement un mouvement moléculaire, c'est-à-dire une vibration dans les corps placés en contact réciproque, par l'effet de laquelle, lorsque, par exemple, la réaction s'opère entre le zinc et l'eau acidulée, de l'hydrogène est mis en liberté, et c'est ce même mouvement vibratoire qui se propage dans le conducteur interpolaire. 2° On peut supposer qu'une partie de la matière pesante des corps mis en contact se constitue à un état de ténuité extrême, s'élance dans le conducteur de décharge et forme ainsi ce que l'on appelle le courant. 3° Étant admis que les divers corps de la nature contiennent en certaine proportion un agent impondérable nécessaire à leur constitution, on est autorisé à penser que son état d'équilibre est troublé par l'action chimique survenue lors du contact de deux substances hétorogènes. Une certaine masse de cet impondérable est mise en branle et la totalité ou une fraction seulement de l'éther en mouvement se reconstitue en équilibre par l'intermédiaire des électrodes, véritables canaux de communication.

La première hypothèse est contraire aux faits exposés dans l'article précédent, à moins de regarder le mouvement vibratoire de la matière comme nécessairement accompagné d'un transport de la matière elle-même, mais alors on retombe dans la seconde ou la troisième supposition.

D'après la deuxième supposition, le courant serait exclusivement constitué par la matière pondérable portée à

un haut degré d'atténuation. Il serait difficile de démontrer rigoureusement en quoi cette manière de voir est fausse, car nous savons combien est grande d'une part la tendance de la matière à se répandre dans l'espace et d'un autre côté combien les corps sont poreux même ceux en apparence très-compactes, ainsi le fer et le platine sont perméables aux gaz à un degré tel que ces fluides les traversent malgré la pression atmosphérique[1]. Pourquoi ne se comporteraient-ils pas de même en présence de la matière arrivée aux dernières limites de la raréfaction. Il se pourrait donc à la rigueur que la force répulsive qui anime les molécules durant une réaction chimique fût assez énergique pour déterminer un véritable flux de la matière à travers la matière elle-même, ce en quoi consisterait le courant. Mais pour comprendre les choses de cette façon il faut imaginer la matière parvenue à un état d'atténuation tel, que très-vraisemblablement elle ne doit plus présenter les caractères de celle qui affecte nos sens. En effet, lorsqu'on examine les fils ayant servi pendant longtemps à transmettre le courant électrique, on observe les signes d'une violente agitation intérieure, leur structure moléculaire est profondément modifiée, mais jamais il n'a été possible de constater une augmentation de poids; dans les cas où deux conducteurs hétérogènes avaient été réunis bout à bout on n'a jamais rencontré dans l'un la moindre parcelle de la substance de l'autre; cependant cela devrait arriver si le courant était un transport de matière à travers le fil conjonctif. Fusinieri a montré, il est vrai, que sous l'influence de puissantes décharges une substance pouvait mécaniquement traverser une plaque métallique, mais dans ces expériences on opérait avec de fortes tensions, et sur de faibles épaisseurs; en outre, on a émis des doutes sur la réalité du phénomène de transport. Admettons néan-

[1] Deville et Troost, *Mondes* et *Comptes rendus*, 17 décembre 1863.

moins que les objections ne soient point fondées, ne voyons-nous pas que les conditions de ces expériences sont trop différentes de celles du courant de la pile pour que leurs résultats puissent servir de base à notre discussion? Je ne sais si les idées exprimées plus haut sur les qualités de la matière parvenue à son état de plus grande division sont acceptées par les défenseurs de la matérialité du courant, toujours est-il que, dans les diverses expériences de transport, la matière conserve sa nature pondérable et chimique, on s'en est assuré expérimentalement; il y a donc là une difficulté infranchissable.

Expliquer ainsi la genèse du courant, c'est reculer la difficulté et non la résoudre, car il restera toujours à dire pourquoi, en plongeant dans un acide un métal attaquable, il peut se produire à la fois une agitation, une expansion et une raréfaction de la matière aussi intenses que celles dont nous admettons l'existence à l'intérieur d'une pile? Peut-être essayera-t-on de répondre en imaginant une grande inégalité entre les états répulsifs des éléments moléculaires. On dira que ces éléments, étant mis en présence, l'équilibre tend à s'établir, d'où résulte un bouleversement considérable dans l'intérieur des substances. Mais alors la violence de cette collision intime doit être immense, car les éléments matériels sont lancés à travers les fils les plus minces avec une puissance telle qu'ils les traversent d'un bout à l'autre malgré la grande longueur et la faible section de ces conducteurs, et cependant quelquefois les fils conducteurs, véritables canaux d'écoulement du courant électrique se déploient sur une étendue de plusieurs milliers de kilomètres. Il ne faut pas se le dissimuler, en creusant cette hypothèse on ne trouve que difficultés et obscurités. Nous sommes éloignés de condamner comme absurdes les idées que nous critiquons actuellement. Toutefois, à notre sens, il n'y au-

rait aucun mal à essayer de remplacer ces suppositions vagues et incomplètes, par des notions qui fussent mieux en rapport avec nos connaissances touchant les actions moléculaires.

La troisième hypothèse nous paraît remplir ces conditions, du reste elle diffère peu de la seconde dans ses éléments essentiels; en effet, rien d'impossible à croire que les molécules réduites à leurs éléments infiniment petits, dilatées et atténuées au maximum ne soient autres que les molécules de la matière pondérable enveloppées par cette autre substance nommée par nous éther et qui, d'après nos idées, n'est autre que la matière à son état atomique élémentaire.

De cette façon, pour comprendre la propagation du courant électrique, il nous suffit d'appliquer les principes précédemment exposés lors de l'étude de la chaleur et de la lumière. Les phénomènes lumineux nous ont appris que dans tous les corps, y compris les métaux, l'éther existe à divers états de densité, et que, autour de chacune des molécules matérielles, on peut supposer une atmosphère ou tourbillon d'éther raréfié. Si ces molécules arrivent au contact alors qu'elles sont libres d'obéir à tous les mouvements, comme cela se présente dans les liquides et les gaz, nécessairement les atmosphères éthérées se pénétreront et se fusionneront. Nous avons déjà dit plus haut que dans ces collisions moléculaires éthérées : 1° lorsque des molécules inégales se réunissent, il se fait un dégagement de chaleur; en d'autres termes, une portion de la force vive des atomes devient libre et se manifeste sous forme de chaleur (voy. p. 151) ; 2° l'atmosphère du système résultant peut être formée par une quantité d'éther différente de la somme de celles appartenant aux molécules composantes (voy. p. 242). Dans ce cas évidemment une portion de l'éther devra se transporter de particule à particule jusqu'à ce que la quantité excédante se soit dissipée, ou

bien, jusqu'à ce qu'au contraire la quantité manquante soit compensée. Les métaux mis en communication avec le corps pourront, suivant leur nature, soit déterminer, soit tout au moins favoriser les perturbations dans l'équilibre des tourbillons éthérés, perturbations qui sont l'origine du mouvement électrique. Ils produiront cet effet parce que le contact une fois établi, l'éther qui les pénètre naturellement, qui est nécessaire à leur constitution, pourra être déséquilibré, et évidemment cette rupture d'équilibre, ce transport d'éther, s'effectuera dans une direction déterminée, celle dans laquelle l'éther possédant la plus grande densité, peut se décharger sur les parties où elle est moindre. Dès lors la fonction spéciale des conducteurs métalliques s'ajoutant à l'action dissolvante du liquide acide sur le métal, il en résulte un augment de la réaction chimique. Sans cette influence adjuvante, les effets de l'action chimique resteraient limités à la première couche de liquide, et dans les autres couches les atmosphères moléculaires ne seraient pas suffisamment ébranlées. On s'explique ainsi l'office du circuit conducteur, car après la réunion du zinc au cuivre à l'aide d'un fil métallique, les excès d'éther dont les molécules du couple sont chargées peuvent se disséminer dans l'arc de jonction et y circuler jusqu'à ce que l'équilibre intérieur soit rétabli.

Le mouvement circulatoire dure aussi longtemps que restent en présence les corps réagissant chimiquement l'un sur l'autre : aussi le dit-on continu; mais évidemment il procède par une série de très-petites oscillations, par un transport successif de section à section; et le mouvement est saccadé, au moins dans les premiers instants comme nous l'apprennent les décharges voltaïques tirées même des piles les plus intenses. Enfin il est aisé de comprendre comment une résistance quelconque introduite dans le conducteur d'une pile en un seul point

diminue dans tout le circuit la quantité d'électricité en circulation en se rappelant une propriété suivante des fluides en mouvement : la masse qui traverse toutes les sections d'un canal demeure constamment la même; donc, lorsqu'une quelconque de ces sections présente la moindre résistance, le cours du fluide est modifié tout entier.

Si telle est l'origine du courant, il s'ensuit que les diverses dispositions électromotrices ne permettent pas avec une égale facilité de recueillir la totalité de l'électricité produite, en d'autres termes de recueillir et de conduire dans le circuit rhéophore l'éther qui passe d'une molécule à l'autre durant l'accomplissement des réactions chimiques à l'intérieur de la pile. On doit rejeter toute disposition voltaïque dans laquelle la réaction entre le métal et le liquide a une intensité assez grande pour rétablir l'équilibre entre les molécules mises en contact. Au contraire, on adoptera celles dans lesquelles la même réaction n'ayant pas une énergie suffisante pour continuer d'elle-même une fois commencée, il faut favoriser son développement en faisant intervenir une substance auxiliaire. Aussi le zinc très-pur ou simplement amalgamé est le métal qu'il convient d'employer à la construction des piles : le potassium, au contraire, serait d'un très-mauvais usage, car à lui seul, en dehors de toute action prédisposante, il décompose l'eau, s'unit à l'oxygène et met l'hydrogène en liberté. Tant il est vrai que si à l'origine de tout courant électrique on trouve une action chimique, la réciproque n'est pas vraie et une action chimique ne sera pas toujours capable de développer un courant électrique extérieur ; un effet dynamique d'électricité se traduisant au dehors du couple électromoteur dans les seuls cas où l'éther des atmosphères moléculaires sera forcé de s'échapper dans l'arc de décharge. Remarquons encore que les rhéophores ne seront pas traversés par toute la chaleur dégagée pendant

la combinaison chimique; ils en recevront une partie seulement qui leur sera communiquée par l'électricité en mouvement.

On comprend maintenant pourquoi les corps réagissant chimiquement l'un sur l'autre avec une très-grande violence, ne sont pas ceux dont l'emploi est le mieux indiqué pour obtenir un courant, car ils ne produisent pas l'électricité avec une intensité proportionnelle à l'énergie de leur combinaison chimique et de la rapidité avec laquelle ils disparaissent dans leurs dissolvants.

Les liquides de nature différente, susceptibles d'agir chimiquement les uns sur les autres, peuvent également favoriser le développement du courant et sa détermination dans une direction définie, en combinant leur action à celle des métaux. La même observation s'applique à plusieurs autres phénomènes secondaires qui se produisent entre les divers éléments mis en présence dans une pile; et c'est l'ensemble de toutes ces circonstances qui, au point de vue pratique, rend telle disposition voltaïque plus avantageuse que telle autre. Ainsi, lorsqu'on veut apprécier la valeur d'une pile, il ne suffit pas d'estimer l'intensité de l'action chimique intérieure. Les expérimentateurs ont étudié de préférence certaines combinaisons électromotrices dans lesquelles l'action extérieure se trouve être précisément égale au travail intérieur; toutefois, même dans ces conditions spéciales, on observe souvent, avons-nous dit, des différences, et l'équivalence ne se vérifie pas constamment. Habituellement on attribue ces irrégularités aux actions locales, et dans un grand nombre de cas une telle interprétation est exacte. Ainsi, pour citer un seul exemple, il faut tenir grand compte du degré de pureté du zinc. On se demandera peut-être si les mêmes effets seraient obtenus en employant le zinc pur et en remplaçant l'eau aiguisée d'acide sulfurique par l'acide nitrique, on sera même porté à croire

que de cette manière le courant devrait acquérir une plus grande intensité, car l'action chimique est plus violente. Semblable observation pourrait être faite à l'égard d'autres métaux chimiquement purs. Il n'en est pas ainsi, et à cela rien d'étonnant, car le cas présent est en tout point comparable à celui précédemment examiné lorsque nous supposions le zinc d'une pile remplacé par du potassium.

Au dire de quelques savants, les réactions chimiques reconnaissent pour cause initiale la tendance à l'expansion des substances mises en présence. Ils disent que la matière de ces corps se trouvant considérablement dilatée sur toute la surface de contact, la combinaison s'effectue et un nouveau corps prend naissance. Mais dans cette manière de voir, il est nécessaire d'imaginer d'abord une force afin de rendre compte des phénomènes chimiques et secondement il faut recourir à une nouvelle hypothèse pour expliquer comment agit l'arc interpolaire en apaisant le trouble moléculaire et l'agitation extrême de la matière atténuée; si bien que tout à la fois on appelle à son aide ces forces dont on prétend débarrasser la physique et, d'un autre côté, en regardant le courant comme un flux matériel, on est obligé de concevoir la matière portée à un tel degré de ténuité qu'elle a perdu tous les caractères de celle qui constitue les corps pesants; en un mot, on admet en outre une matière qui ne diffère réellement que par le nom de celle appelée par nous éther.

Donc le moyen le plus simple de comprendre les phénomènes consiste à regarder le courant comme naissant du choc de la matière pondérable auquel s'adjoint un trouble intense survenu dans les atmosphères éthérées étendues autour des molécules, et ce dernier mouvement est un des éléments principaux du flux électrique.

De cette façon on concilie en quelque sorte la théorie chimique et la théorie du contact, c'est-à-dire les deux

opinions qui pendant longtemps ont divisé les physiciens sur l'origine de l'électricité dynamique. Assurément le contact ne peut pas, en tant que contact, engendrer le courant, pas plus que, si l'on veut obtenir un écoulement d'eau dans un tuyau, il ne suffit pas d'adapter un tube à un récipient, il faut encore que le vase soit rempli de liquide. Et cependant l'application du tube est une condition *sine qua non* du phénomène. Il est bon de remarquer du reste que telle était réellement l'opinion des premiers électriciens qui soutinrent les théories du contact. Suivant eux, toutes les substances renfermaient une certaine dose d'électricité naturelle, et à l'instant où elles étaient extrêmement rapprochées, mieux encore, contiguës, l'équilibre électrique était rompu, puis un nouvel état d'équilibre s'établissait qui avait pour résultat immédiat le développement du courant, et si le flot d'électricité ne pouvait s'écouler il se constituait à l'état de tension. On comprend ainsi parfaitement l'impulsion initiale, mais comment expliquer le travail continu de la pile? Ces physiciens ne pouvaient donc expliquer de la sorte que l'état initial de la pile. Des expériences à l'abri de toute objection semblent démontrer que certains corps, spécialement des métaux, sont susceptibles de présenter une tension électrique initiale dans des conditions où il est impossible de constater une réaction chimique. Marianini, le premier, plus tard Gassiot, ont prouvé que l'équilibre naturel des substances peut être troublé lorsqu'elles sont rapprochées à une fort petite distance [1]. Plusieurs savants n'acceptent pas les conclusions de ces auteurs et rapportent les résultats de leurs expériences soit à une oxydation exercée par l'air qui, parfaitement sec, agit sur tous les métaux, même les moins altérables, tels que

[1] Voy., pour Marianini, ses mémoires, et, pour Gassiot, *les Mondes*, 17 décembre 1865, p. 577.

l'or, le platine, etc., soit à quelque autre cause du même genre. Néanmoins ces causes n'ayant jamais été constatées, et étant restées jusqu'à présent inaccessibles à nos procédés d'expérimentation, on a le droit de se refuser à en admettre l'existence.

D'un autre côté, il est une question que l'on peut toujours adresser à la théorie chimique : *Quelle est en dernière analyse la cause initiale de l'action chimique?* Ne peut-on pas dire que la constitution moléculaire ou éthérée des corps étant différente pour chacun d'eux, lorsqu'ils sont placés à une très-petite distance ou en contact immédiat, une perturbation intérieure se manifeste et donne naissance au courant ? Et alors n'est-ce point là un véritable effet de contact? Nous arrivons ainsi à conclure que les deux théories, interprétées logiquement, ne sont nullement contradictoires ; par conséquent, la discussion des faits innombrables fournis pour ou contre chacune d'elles devient inutile. A ceux qui se contentent d'affirmer que l'action chimique dépend de la constitution moléculaire, nous demanderons quelle idée ils se font de cette condition. Si on nous répond en invoquant la *polarité*, nous insisterons pour savoir en quoi consiste cette polarité, car le terme servant habituellement à désigner l'action de forces émanées de centres fixes, on doit reconnaître que de semblables forces ne permettent pas d'expliquer les phénomènes du courant. De plus, nous revenons ainsi à l'idée des forces, pures abstractions, utiles tout au plus comme termes de convention destinés à représenter les faits avec concision.

Plusieurs physiciens éminents, excellents expérimentateurs, font jouer un grand rôle à cette force de polarisation. Mais, lorsqu'ils essayent de faire comprendre la signification réelle et pratique de cette expression, ils n'en donnent aucune idée nette ; tout au plus arrivent-ils à dire qu'ils désignent ainsi une rupture d'équilibre dans l'élec-

tricité naturelle, suivant une modalité déterminée. Celte hypothèse est assurément très-ingénieuse, mais elle n'est pas mieux prouvée que toutes celles présentées sur le même sujet. Nous devons avouer que l'on rencontre de nombreuses difficultés à traiter théoriquement les conditions pratiques des divers genres de piles, et cependant elles se réduisent toutes à des cas particuliers de ce phénomène multiforme nommé l'action chimique dont nous pouvons comprendre le mécanisme général grâce au principe formulé plus haut; mais pour donner la raison des faits considérés un à un, il faudrait à l'occasion de chacun d'eux savoir exactement les conditions des phénomènes, comment les molécules sont disposés, quel est l'état d'équilibre de leurs atmosphères, etc., toutes choses dont la détermination a été jusqu'à ce jour impossible et qui peut-être dépasse les limites de l'intelligence humaine.

Nous ne voulons pas nous égarer dans ce labyrinthe, et nous nous en tenons aux considérations développées page 149. Les réactions chimiques, avons-nous dit, sont parfaitement comparables entre elles et aux autres affections de la matière elles sont réductibles à de simples actions mécaniques et l'étude du courant jette une grande lumière sur les phénomènes dits d'affinité. Le développement du courant est assurément un travail qui au fond ne diffère nullement de celui qui constitue l'action chimique; seulement dans le premier s'accomplit simultanément un transport du principe éthéré d'un point à un autre, tandis que, dans l'action chimique proprement dite, tout se réduit à un trouble local des atmosphères moléculaires avec échange d'éther d'une molécule à l'autre.

Nous résumerons ce chapitre en quelques conclusions générales : 1° l'action chimique est réellement la cause du courant en circulation dans une pile; mais dans les diverses dispositions électro-motrices, à de rares exceptions près, le mouvement électrique évalué sur du fil

conjonctif n'est pas précisément égal à la somme du travail chimique accompli dans les divers éléments de la pile.

2° Quant à la genèse du courant, sans nier complétement la théorie qui fait du courant un transport de matière, cependant après un examen scrupuleux des faits, il nous parait plus exact de le regarder comme un mouvement de l'éther qui imprégnant tous les corps, est nécessaire à leur constitution. Selon nous, l'équilibre éthéré des éléments d'un couple voltaïque subit un trouble profond par le fait de la réaction chimique s'établissant entre ces éléments, et un certain nombre d'atomes éthérés détachés des tourbillons moléculaires s'échappent à travers l'arc interpolaire. De cette façon se trouve établie la corrélation des phénomènes chimiques et électriques.

3° Nous établissons une connexion entre les phénomènes chimiques et la structure moléculaire des corps, telle qu'elle nous est révélée par la lumière ; nous concevons enfin comment certaines substances sont incapables de propager un mouvement transversal puisque leur éther intérieur vibre seulement dans le sens longitudinal.

Ce chapitre est un peu long et, sans doute, la lecture en paraîtra pénible à certaines personnes ; mais les questions importantes et délicates ne doivent pas être traitées superficiellement, elles méritent qu'on s'impose quelque peine pour les comprendre.

CHAPITRE V

RELATIONS ENTRE L'ACTION CHIMIQUE ET LA CHALEUR DANS LA PILE.

Nous avons reconnu que la source réelle du flux électrique circulant dans les rhéophores d'une pile est l'action

chimique qui se passe à l'intérieur des cellules de cet appareil, et en vertu de laquelle un corps se substitue à un autre dans les liquides employés pour armer l'électromoteur. Or, dans toute réaction chimique, il se dégage une quantité définie de chaleur; par conséquent l'origine de la chaleur intérieure d'une pile n'est pas douteuse. Il nous reste seulement à préciser les lois de sa distribution dans les couples et dans les électrodes, et à établir la comparaison entre les phénomènes spéciaux à chacune de ces deux localités voltaïques.

Nous exposerons d'abord les résultats observés pendant les décompositions électrochimiques, puis nous mettrons en regard ceux relatifs aux actions calorifiques.

La loi fondamentale qui régit l'électrolyse des composés chimiques a été découverte par Faraday, dont elle porte le nom; elle s'énonce ainsi : Lorsque dans le circuit interpolaire d'une pile on introduit un nombre quelconque de voltamètres renfermant chacun une substance réductible par le courant, les poids des éléments séparés sont entre eux comme leurs équivalents chimiques.

Ainsi, pour 1 gramme d'hydrogène mis en liberté, on trouvera 31,5 de cuivre, 104 de plomb, etc. Donc l'action voltaïque est parfaitement définie et soumise aux lois de l'affinité chimique. A cause des nombreuses actions secondaires qui accompagnent les décompositions électrolytiques des groupes moléculaires un peu compliqués, il est parfois difficile de vérifier l'exactitude de la loi énoncée ci-dessus au moins pour les éléments transportés ou pôle positif. Mais Becquerel a montré qu'elle se confirmait constamment quant à l'élément électropositif, par suite il doit en être de même à l'égard des éléments électronégatifs. Donc nous poserons cette règle générale que, « dans l'action électrolytique d'un courant, un élément se dépose en quantité proportionnelle à son équivalent chimique. »

La présente loi a pour homologue celle qui a été observée

touchant les actions calorifiques. Une quantité donnée de chaleur élève à une température égale des poids de substances chimiquement équivalents[1]. Si bien que les équivalents chimiques, thermiques et électrolytiques, multipliés par un rapport constant, se convertissent les uns dans les autres.

La détermination rigoureuse de ces équivalents est extrêmement difficile. Quelques expériences ayant été faites par nous dans cette direction, nous en citerons les résultats simplement pour fixer les idées. Une pile de Bunsen de 30 éléments capables de donner une belle lumière électrique, décompose 0gr,106 d'eau par seconde, et élève de 1° dans le même temps la température de 38 grammes d'eau, c'est-à-dire produit 0,038 de calorie, quantité équivalant à 6,12 kilogrammètres[2].

En employant une pile montée avec du zinc pur et de l'acide sulfurique, on constate la loi suivante : « La quantité de chaleur dégagée par le seul fait de la combinaison chimique, est égale à celle que l'on peut développer au moyen du courant électrique ; mais, dans le calcul de cette dernière quantité, il faut tenir compte et de la chaleur renfermée dans la pile et de celle propre au circuit interpolaire, de telle sorte que l'égalité : chaleur totale de combinaison = chaleur dans la pile + chaleur dans l'arc conducteur, est toujours satisfaite.

Si une machine électromagnétique est intercalée dans le circuit d'une pile et produit un certain travail mécanique, la quantité de chaleur de l'arc conducteur diminue; or, connaissant l'équivalent mécanique de la chaleur

[1] Voy. plus haut livre I, chap. III, p. 21.

[2] Ces nombres montrent clairement combien sera coûteux le travail mécanique exécuté par une machine électromotrice correspondant à un certain poids de zinc dissous dans la pile; dans le cas présent, on a un douzième de cheval-vapeur; mais les valeurs que nous donnons sont de simples approximations.

(voy. liv. I, chap. III), il est facile de convertir le travail obtenu en chaleur, le résultat est précisément égal au déficit calorifique observé dans le rhéophore. Tous ces faits ont été mis en pleine évidence dans une série d'expériences très-rigoureuses, entreprise par Favre.

Cependant Soret a démontré que la chaleur transformée en travail mécanique n'était pas exclusivement empruntée à l'arc extérieur, et que l'intérieur de la pile contribuait aussi à cette dépense. La solution complète de la question réclame donc de nouvelles expériences[1]. La loi dont nous parlons est une remarquable conséquence du principe de la conservation des forces vives, car s'il existait dans le circuit une quantité de chaleur qui ne fût pas produite par l'action chimique, cette quantité aurait été créée de rien, et si réciproquement la quantité totale de chaleur intérieure et extérieure se trouvait être moindre que celle engendrée par l'action chimique ; il y aurait annihilation du mouvement, ce qui est impossible[2].

Une décomposition chimique est un travail exécuté par le courant, elle peut donc se substituer directement à la chaleur qui se développe dans le circuit. On a un bel exemple de cette transformation dans l'expérience suivante souvent répétée par nous. Faisant usage d'une forte pile grand modèle de Bunsen, ayant au moins 30 éléments, telle que celle servant habituellement à produire la lumière électrique, on prend pour conducteurs deux fils de platine un peu fins et on les plonge peu à peu

[1] Soret, *Corrélation de l'électricité*. Genève, 1858.

[2] Clausius donne la relation suivante comme expression de la quantité de chaleur H en fonction de l'intensité I d'un courant électrique :

$$H = A . l . I^2,$$

A étant l'équivalent de la chaleur pour l'unité de travail, l étant l'intensité du courant exprimée en unités mécaniques. (Voy. B. U., *Archives sc. nat*, 1857, t. XXXVI, p. 121.)

dans un vase rempli d'eau. Au commencement il n'y a aucune décomposition chimique; mais, au contraire, on observe de petites décharges lumineuses, et la surface des fils est revêtue d'une sorte de voile ou de gaîne lumineuse qui donne au fil le même aspect que s'il était incandescent, quoiqu'il ne le soit pas. Les fils font entendre un léger sifflement dû très-probablement au dégagement de la vapeur; enfin l'eau s'échauffe rapidement et, en quelques instants, arrive à l'ébullition, sous l'influence de la chaleur qui, par l'intermédiaire de deux pointes de charbon, se serait manifestée sous la forme d'une brillante gerbe de lumière. Mais si l'on enfonce les électrodes dans l'eau, lorsqu'ils atteignent une certaine profondeur, immédiatement l'action chimique commence, la température du liquide diminue et tout retombe dans le cas d'une électrolysation ordinaire avec légère élévation de température. Dans cette belle expérience, il y a évidemment substitution d'une action chimique à une action calorifique. Le dégagement de chaleur observé dans la première phase du phénomène nous paraît devoir s'expliquer ainsi : l'action calorifique du courant, étant condensée sur une faible surface, échauffe fortement le fil de platine; cependant le fil ne peut atteindre l'incandescence, car il y a soustraction incessante de chaleur de la part du liquide qui l'environne, mais il atteint une température supérieure à celle de l'ébullition de l'eau, par suite celle-ci passe à l'état sphéroïdal autour de la surface des électrodes et dès lors ne les mouille en aucun point. Le contact immédiat de l'eau et de l'électrode n'existant pas, la décomposition chimique n'a point lieu. Mais si le fil conducteur pénètre de plus en plus dans la masse fluide, la surface en rapport avec l'eau augmente de même, et à partir d'une certaine longueur immergée la déperdition de chaleur est telle que le fil ne peut conserver une tempéra-

ture suffisamment élevée pour maintenir l'eau à l'état sphéroïdal; alors le contact s'établissant entre l'eau et le platine, la décomposition chimique commence[1]. On obtient des effets analogues avec les courants extrêmement courts des batteries de Leyde. En faisant passer la décharge dans un fil métallique, on les volatilise sur une longueur assez considérable; mais en dirigeant la décharge à travers l'eau, tout se réduit à une décomposition peu marquée.

Il est donc évident que tout travail chimique déterminé qui s'accomplit entre les pôles d'une pile peut être remplacé en totalité ou en partie par un travail soit thermique soit mécanique. Thompson dit avec une grande justesse que supposant trois piles égales dont l'une décompose un liquide, la seconde échauffe un fil et la dernière exécute un travail mécanique, ces piles étant par hypothèse exemptes de toutes résistances passives intérieures, on obtient pour un même poids de zinc dissous une quantité constante de travail, laquelle transformée en action mécanique ordinaire représente l'équivalent mécanique de la chaleur. Mais nous avons vu dans le premier livre quelle énorme quantité de chaleur devient latente par le fait de la dissociation élémentaire qu'exige la moindre décomposition chimique; aussi, dans l'exemple cité, l'effet chimique doit paraître de beaucoup inférieur aux deux autres, et il en est réellement ainsi.

Actuellement plusieurs questions importantes se présentent à nous. Demandons-nous premièrement : à quel genre d'action physique se réduisent les décompositions chimiques? pourquoi, si l'on veut obtenir un même effet avec

[1] Voy. notre mémoire sur la lumière électrique, p. 74, *Nuovo Cimento*, vol. IV. Cette expérience, que nous croyions nouvelle, avait déjà été faite par Quet et ensuite par Despretz avec une pile de 100 éléments de Bunsen, aussi ce dernier a-t-il pu obtenir sur les liquides des phénomènes extraordinaires de dilatation.

une certaine pile, un seul couple suffira? avec d'autres, au contraire, il faudra disposer plusieurs éléments en batterie? Évidemment cette inégalité d'action dépend du rapport qui existe entre le travail actif et le travail passif dans chacune des piles employées. Le travail actif, c'est la combinaison du métal; les travaux passifs sont la décomposition de l'eau et celle des acides employés. Un seul couple suffira ou non pour électrolyser une substance donnée suivant que le travail du premier genre surpassera ceux du second, ou leur restera inférieur. Voici, du reste, un exemple pratique.

Nous avons parlé plus haut des résultats obtenus par Favre. Une fois en possession de ces données expérimentales, il raisonne de la sorte : pour décomposer un équivalent d'eau, le travail chimique du couple (ou plutôt la fraction de cette action qui passe dans les rhéophores) doit nécessairement fournir à l'électrolyte une quantité de chaleur égale à celle qui se dégage pendant la formation d'un équivalent d'eau, soit 34462 calories (nombre de Favre)[1]. Or, dans le couple de Grove, il y a d'abord la formation de sulfate de zinc qui donne 53258 calories par chaque équivalent de zinc dissous, nombre dont il faut retrancher la chaleur enlevée par le dégagement de l'oxygène de l'acide azotique réduit. Si cet acide devient AzO^2 ou AzO^3, la quantité à soustraire est 6887 ou 13634; de sorte que dans le cas le plus défavorable, le nombre des calories fourni par le couple est encore de 39624; quantité plus grande que 34462. De la chaleur de sulfatation du zinc 53258 il faut retrancher dans le couple Wollaston celle qui est absorbée par le dégagement de l'hydrogène, ou 34462; dans le couple de Daniell celle qui est absorbée par la réduction du cuivre soit 29605; de sorte qu'il reste, pour le premier, seule-

[1] Daguin, *Tr. de physique*, t. III, p. 591. 2e édition.

ment 18796 calories et pour le second 23453, quantités de chaleur inférieures à celles qu'exige la décomposition de l'eau[1]. Cet exemple nous montre à lui seul combien il importe d'évaluer la somme de travail actif et passif de la pile et nous conduit à croire que l'électrolyse de l'eau est un effet de cette dissociation produite par la chaleur dont nous avons parlé (liv. I, chap. XI, p. 97). Nous écartons bien entendu le cas où les électrodes (fils de platine par exemple) sont capables de décomposer l'eau en vertu d'une action propre. Dans les circonstances actuelles, nous voyons une action chimique d'une notable intensité se produire à une basse température ; cette particularité tient à l'absorption continue de chaleur que nécessite la mise en liberté des éléments gazeux. On doit aussi tenir compte de la rapidité avec laquelle les éléments isolés sont séparés, circonstance favorable, car elle empêche leur recombinaison ainsi que le prouvent les expériences de M. Deville sur la dissociation, et celles de M. Silvestri qui a observé la recombinaison lente des gaz dégagés par voie électrolytique lorsqu'on les laisse mélangés les uns avec les autres en présence de l'eau[2].

Un travail assez étendu de Marié-Davy et Troost, continué plus tard par M. Marié-Davy, a prouvé que les *forces électromotrices* mesurées suivant la méthode de Ohm sont *proportionnelles aux quantités de chaleur dégagées par les actions chimiques qui se passent entre les éléments des couples :* aussi peut-on légitimement employer les forces électro-motrices à mesurer les quantités de travail moléculaire et les quantités de chaleur qui en résultent.

En outre, de nombreuses expériences permirent à ce physicien de conclure que *les quantités spécifiques de chaleur, dégagées dans ces combinaisons sont dans le même*

[1] *Annales chim. et phys.*, 3e série, t. III, p. 423.
[2] *Nuovo Cimento*, t. XXVII, p. 305.

ordre et dans les proportions assignées par les chimistes aux affinités de ces substances pour l'oxygène[1].

Ainsi les forces électromotrices étant proportionnelles aux quantités de chaleur et celles-ci aux affinités chimiques, les forces électromotrices sont proportionnelles aux affinités, et par suite les affinités chimiques sont proportionnelles aux quantités de force vive ou de chaleur produites par la combinaison d'un équivalent des diverses substances.

Toutes ces lois cadrent parfaitement avec celles exposées précédemment sur les actions calorifiques (liv. I, chap. XIV). Elles avaient été déjà entrevues par les physiciens du commencement de ce siècle, qui reconnurent que les forces électro-motrices sont proportionnelles aux affinités chimiques; et ces observations donnèrent naissance aux théories électro-chimiques de Berzelius et aux échelles d'électrotisme de Marianini. A ce propos, il est bon de faire observer que le seul moyen que nous ayons d'évaluer numériquement les affinités chimiques consiste à estimer soit la quantité de chaleur dégagée pendant la combinaison, soit l'intensité du courant qui prend naissance dans ces mêmes conditions.

Nous résumerons brièvement les lois dynamico-électriques de la pile en quelques propositions. Le pouvoir électro-moteur d'une pile est proportionnel : 1° à la somme algébrique des travaux moléculaires intérieurs (travaux positifs et négatifs); 2° à la somme des travaux résistants accomplis chemin faisant par le courant à l'intérieur de l'appareil voltaïque et dans le circuit extérieur; 3° à la quantité de chaleur développée dans le circuit, en supposant nulles les résistances extérieures au circuit, et en

[1] Voy. les mémoires de Marié-Davy, cités plus haut, intitulés : *Recherches théoriques et expérimentales sur l'électricité*. Paris, 1861.

prenant pour puissance motrice la somme des actions chimiques accidentelles et normales; 4° aux quantités de chaleur engendrées par les travaux moléculaires des combinaisons effectuées.

Ces lois ne diffèrent pas, quant au fond, de celles posées précédemment par Joule. Il établit que, 1° le courant est proportionnel au nombre des atomes d'eau ou de zinc consommés à lui donner naissance; 2° la chaleur dégagée par un couple voltaïque est en raison directe de la force électromotrice et du nombre des atomes décomposés; 3° la chaleur totale du circuit est proportionnelle au produit du nombre des atomes décomposés dans chacun des couples multiplié par la somme des forces électromotrices[1].

Soit donc une pile simple et exempte de toute action locale, on peut donner de la genèse du courant la théorie suivante. Par la substitution du zinc à l'hydrogène une quantité finie de force vive évaluable en calories devient disponible, c'est la puissance motrice. Ce mouvement se transmet au circuit sous forme de mouvement électrique; que l'on considère celui-ci comme un flux de matière pondérable, ou d'éther : lorsque ce flux rencontre des résistances, il met en branle les atomes du milieu résistant, et la force vive électrique devient chaleur; autrement dit, une partie du mouvement électrique de translation se convertit en vibration calorifique de l'éther et de la matière pesante. Quand la force vive du courant n'est en aucun point dépensée à obtenir un travail extérieur, l'équivalence est complète entre les quantités de chaleur produites par l'action chimique et celles que renferment les cellules de la pile et les rhéophores du circuit : dans le cas d'un travail extérieur mécanique, radiant, électrolytique, etc., il y aura entre ces deux quantités une différence équivalente au travail.

[1] Joule, *Arch. d'élect.*, 1852, t. II, p. 54.

La connexion intime que nous avons reconnue entre les diverses conditions de la pile et la quantité de chaleur dégagée par l'action chimique nous apprend que l'explication des décompositions électrochimiques devient très-simple quand on les compare aux phénomènes de dissociation produites par la chaleur seule; à cette différence près, que l'action calorifique étant alors concentrée sur une très-petite surface acquiert par cela même une plus grande énergie. Plus on diminue les surfaces et plus les décompositions sont faciles, si bien qu'une pile étant donnée, ses effets électrolytiques sont maximum quand les rhéophores sont des fils minces. Wollaston est même parvenu à obtenir des effets de décomposition chimique à l'aide de la machine électrique ordinaire en concentrant toute son action sur la section extrême des conducteurs; pour cela il scellait l'électrode dans un tube de verre, de telle sorte que le fil communiquât avec le liquide seulement par la pointe. Si l'action calorifique est trop intense, par exemple lorsqu'on emploie une très-forte pile avec des rhéophores ayant un petit diamètre (voy. p. 365), la température dilatant le liquide d'une façon excessive, celui-ci passe à l'état sphéroïdal autour des fils conducteurs, une forte radiation s'établit dans la masse qui est traversée en même temps par une série de petites décharges instantanées, et la décomposition n'a pas lieu. Ces observations nous donnent une idée assez simple du mécanisme de l'analyse de l'eau par la pile, et en même temps elle confirme l'existence d'une relation intime entre la chaleur et l'électricité. L'action mécanique du courant lorsqu'elle est concentrée dans le fil rhéophore fait osciller les atomes en leur communiquant des vibrations excessives, à tel point qu'ils ne peuvent rester unis étant lancés hors de leurs sphères d'action réciproque. De plus, le courant leur communique une quantité de force assez grande pour les maintenir à l'état de molécules isolées, et ainsi ils abandonnent

la combinaison. Les atomes, lors de leur mise en liberté, étant dans un état électrique positif ou négatif, sont entraînés au pôle de nom opposé à celui de leur signe, mais à cause de la mauvaise conductibilité du milieu, ce transport est le résultat d'un échange d'atomes s'effectuant couche par couche. Donc, sans réclamer l'aide d'aucun principe nouveau, tout le mécanisme voltaïque se réduit à un jeu spécial de la force vive calorifique mise en disponibilité pendant les réactions chimiques; cette action, transportée d'une section à l'autre des conducteurs interpolaires par le torrent électrique, anime les masses sensibles et l'éther de mouvements vibratoires qui se traduisent au dehors par des élévations de température, des radiations lumineuses, des décompositions chimiques. Ainsi se trouve justifiée cette heureuse expression de Faraday, déjà citée, que le courant est une action chimique en circulation.

Nous avons dit que les phénomènes de la pile sont un cas particulier de l'action chimique, phénomène beaucoup plus général, de telle sorte que l'on peut chercher dans l'action chimique l'explication du courant, mais la réciproque n'est pas vraie, et une action chimique ne se réduit pas simplement à une manifestation électrique. Il importe de bien se pénétrer de cette distinction, sinon on trouverait des objections là où elles n'existent pas; par exemple, il ne faudrait pas croire que dans toutes les piles électro-chimiques les lois précédemment indiquées se vérifient complétement.

Ces lois sont tout au plus applicables aux couples formés par le zinc amalgamé et l'acide sulfurique, c'est-à-dire à ceux qui ont servi aux expériences d'où les lois ont été déduites; avec d'autres dispositions, elles sont en défaut. Ainsi, d'après Raoult, en employant le zinc et l'acétate de zinc avec le plomb et l'acétate de plomb, la quantité de chaleur due à l'action chimique égale 15691 calories et la chaleur totale d'une pile montée avec ces éléments

est représentée seulement par 12438 : en employant le cuivre et le nitrate de cuivre concurremment avec l'argent et le nitrate d'argent; la première valeur est 16402 tandis que la seconde est 7789[1].

Dans ces circonstances les phénomènes se compliquent de réactions secondaires. Disons toutefois que même en considérant les cas les plus simples on trouve des irrégularités non moins évidentes. Ainsi il semble que, par l'introduction de fortes résistances dans le circuit, on puisse régler l'action chimique de façon à ce que la durée du courant d'une pile soit en raison inverse de son intensité. Nos expériences n'ont point confirmé ces prévisions; en effet, une pile de Bunsen bien isolée, avec un conducteur gros et court, nous a donné 527 pour le produit de la durée par l'intensité; la même pile reçut un fil long et fin, et la valeur du produit descendit à 260. La différence observée ne put être attribuée aux déperditions, car celles-ci (calculées en comparant la pile d'expérience à une autre placée dans les mêmes conditions d'isolation) furent trouvées de beaucoup inférieures à la différence constatée pendant l'expérience[2]. Par conséquent, dans les piles, même dans les meilleures conditions, si la résistance du circuit vient à augmenter, une grande partie de l'électricité en mouvement se décharge par une voie autre que le fil conducteur. Probablement le courant se décharge en revenant sur lui-même par l'intermédiaire du liquide intérieur, d'où résulte pour ce dernier une élévation de température.

En étudiant avec un galvanomètre le courant d'une pile animant une lampe électrique, on voit la déviation de l'aiguille aimantée rester constante depuis l'instant où on ferme le circuit jusqu'à l'extinction de la lumière, mais

[1] *Cosmos*, 16 octobre, p. 430.
[2] Voy. Mémoire sur la lumière électrique, *Nuovo Cimento*, t. IV

pendant ce temps la longueur de l'espace lumineux présente de grandes variations, c'est-à-dire la quantité de molécules mises en vibration ne demeure pas la même. Ce fait mérite d'être rapproché du suivant observé par Faraday, touchant les décompositions éloctrochimiques. Lorsqu'on augmente le nombre des éléments d'une pile communiquant avec un voltamètre, l'électrolyse ne subit aucune variation, si en même temps un fil de platine, traversé par le courant, est porté à l'incandescence sur une longueur d'autant plus grande que le nombre des couples devient plus considérable. Donc une quantité déterminée d'électricité, mesurée par une certaine déviation galvanométrique ou par une action chimique définie, est susceptible de mettre en mouvement une masse de matière pondérable proportionnée à la tension et aux vitesses virtuelles du courant. Ces faits confirment que la tension est pour un courant ce qu'est la pression ordinaire qui pousse un fluide en mouvement. En effet, dans les expériences précédentes, nous pouvons comparer la pile de Bunsen à un moteur hydraulique dans lequel on diminue graduellement les résistances à mesure que s'abaisse le niveau de l'eau employée à entretenir le mouvement, de telle sorte que la masse et la vitesse du liquide, au sortir du coursier, peuvent rester constantes. Cette pression, avons-nous déjà dit, suppose un mouvement oscillatoire, car les faits cités en ce moment appuient notre théorie, puisque la masse ébranlée effectivement dans le mouvement actuel est proportionnelle à l'intensité de la vibration dans le mouvement dit virtuel.

Les expériences de Soret prouvent que tout travail dynamique exécuté dans le circuit interpolaire réagit sur le courant. Aussi a-t-on raison d'admettre que la loi de l'intensité est dépendante des travaux qui s'accomplissent dans le circuit lui-même. Ces travaux sont de divers genres et comme durant un travail mécanique les actions chimiques

diminuent en raison simple de la quantité d'électricité et l'action thermique en raison doublée de cette même quantité, il s'ensuit que la chaleur dégagée doit être moindre que le travail effectué.

L'électricité étant un mode de mouvement, comme la chaleur et la lumière, elle se modifie diversement selon la nature du travail produit. Mais que le courant produise du mouvement, de la lumière ou de la chaleur, la force vive ne pouvant ni se perdre ni se créer, la même quantité de travail sera mise en jeu dans toutes ces transformations; celui qui essayerait de contrôler expérimentalement ces inductions théoriques rencontrerait des difficultés nombreuses, car il lui faudrait reconnaître les divers genres de travail, et évaluer numériquement chacun d'eux d'après les principes de la mécanique. Nous rencontrerons des écarts encore plus considérables en étudiant les phénomènes d'induction, lesquels représentent un travail d'une nouvelle espèce[1]. Mais, quelle que soit la diversité des métamorphoses, le principe général de la conservation de la force vive reste vrai. Parvenus à ce point de notre étude, ne devient-il pas évident que l'électricité n'est qu'une forme de mouvement dont les rapports avec la chaleur et l'action chimique sont des plus étroits; que ce n'est point un principe distinct des autres agents naturels comme le croyaient les premiers expérimentateurs, et que même elle se réduit à une modalité secondaire des forces de la nature. Cette conclusion deviendra encore plus évidente par la suite.

[1] Les questions que nous traitons actuellement sont d'un grand intérêt; elles ont occupé des physiciens distingués. Soret et Clausius (*Archives des sciences naturelles*, t. XLVI, 1857, p. 120 et suivantes et p. 170); Favre (*ibid.*, 1859, p. 359). Voy., dans la note de Clausius, comment il rattache le fait fondamental à la théorie de la chaleur. Au fond, tous ces auteurs admettent une augmentation de résistance, mais de *résistance dynamique*. (Voy. Leroux, *loc. cit.*, p. 160.)

Dans ce sujet, règne encore sur plusieurs points une grande obscurité; il ne nous appartient pas de la faire disparaître, mais nous engagerons les observateurs à examiner ces problèmes, ils présentent un beau sujet de recherches, et leur solution fournira des données utiles sur la corrélation des divers mouvements.

Afin de rendre plus claires les vues exposées un peu plus haut sur le transport des éléments par le courant, il importe de faire la remarque suivante. Les physiciens discutent encore pour savoir si, oui ou non, les liquides peuvent conduire un courant sans éprouver une décomposition électrolytique. La question est fort délicate. Cependant considérant que les liquides appartiennent à la classe des corps diaphanes, considérant combien ils s'éloignent des métaux par leurs propriétés optiques, on est autorisé à croire que, de même que les métaux ne transmettent pas les mouvements transversaux, de leur côté les liquides sont dans les conditions semblables à l'égard des mouvements longitudinaux. Tout au moins ils ne se laissent pénétrer par les vibrations longitudinales que jusqu'à une petite profondeur, et cela suffit pour troubler leurs molécules, d'où il résulte une série de décompositions et de recombinaisons successives, par l'intermédiaire desquelles l'équilibre de tension du courant se trouve établi.

Aux premiers paragraphes de ce chapitre nous avons indiqué comment plusieurs substances étant précipitées voltaïquement, les poids des substances déposées dans un même temps sont proportionnels à leurs équivalents; nous pouvons conclure de là que tous les corps présentent la même capacité électrique; en d'autres termes, la même quantité de mouvement électrique est toujours nécessaire pour décomposer un équivalent d'une substance quelconque. Telle est la seule façon exacte de comprendre l'expression capacité électrique. Nous retrouvons là une loi parfaitement homologue de celle qui a été posée en traitant

des effets calorifiques produits par les actions mécaniques. Jusqu'ici nous ignorons complétement si les quantités d'éther qui forment les atmosphères des atomes pondérables sont égales, quelle que soit la nature des particules matérielles; cependant la chose n'est pas impossible, et dans ce cas les atmosphères pourraient différer entre elles par la densité et par la vitesse de rotation.

Voilà tout ce qu'il nous est permis de dire sur une matière aussi difficile; et sur laquelle nos connaissances sont très-insuffisantes malgré le nombre des expériences, faites à ce sujet. Voyons maintenant si, en renversant le problème et en cherchant les lois de l'électricité mise en mouvement par la chaleur, il est possible de pénétrer plus avant dans cette question pleine de mystères.

CHAPITRE VI

DE L'ÉLECTRICITÉ DÉGAGÉE PAR LA CHALEUR : THÉORIE DÉFINITIVE DU COURANT.

La loi de réciprocité s'applique à tous les phénomènes naturels; ainsi l'électricité engendre la chaleur, à son tour la chaleur engendre l'électricité. La chaleur (et elle agit alors de même qu'une réaction chimique) trouble l'équilibre moléculaire, par suite elle produit courant et tension électrique. De plus les conditions de ce phénomène le rendent éminemment apte à nous renseigner sur la nature du flux électrique.

Dans les machines électriques ordinaires les mêmes actions mécaniques qui développent l'électricité peuvent devenir sources de chaleur. On a utilisé surtout le frottement directement ou indirectement. Dans les nouvelles machines électriques de Holtz et de Bertsch, il semble que l'électricité ne soit pas due à une action mécanique.

Cependant, là même, il se fait une transformation de force mécanique en électricité. Par exemple, quand dans la machine de Bertsch (fig. 25) on fait tourner le plateau PP′ avant d'avoir électrisé l'armure E, on n'éprouve aucune résistance, mais elle devient très-sensible après cette élec-

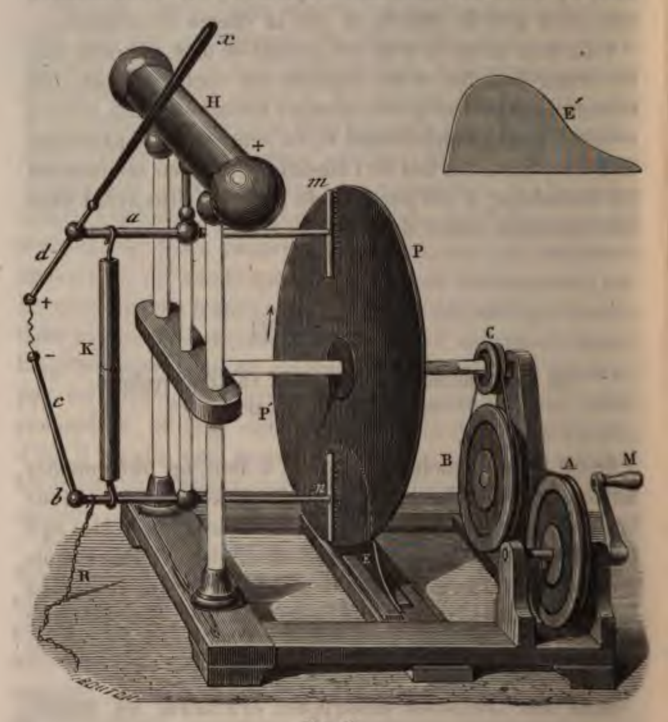


Fig. 25.

PP′, Plateau en caoutchouc mis en mouvement par le système MABC. — E, Secteur en caoutchouc mobile qu'on électrise par friction. — *n*, Peigne communiquant au conducteur *v c* une tension négative.— *m*, Peigne communiquant au conducteur *a d* une tension positive.—K, Condensateur servant à augmenter l'intensité de l'étincelle.—R, Chaîne qui, mettant *b c* en communication avec le sol, augmente l'intensité des étincelles.

trisation, car alors le secteur électrisé agit par influence sur le plateau. Il se fait donc là une transformation de travail mécanique en électricité, et médiatement en une quantité équivalente de chaleur qui se manifeste par l'étincelle jaillissant entre les conducteurs. Réciproquement, avec l'électricité fournie par une machine ordinaire, on peut faire tourner le disque de la machine de Holtz; alors les tensions électriques disparaissent transformées en mouvement mécanique.

Dans tous ces cas, l'effort mécanique qui met en vibration les molécules des corps dans la couche superficielle, trouble leur équilibre d'autant plus facilement qu'elles sont moins fortement soumises de la part des voisines aux pressions intérieures dont nous avons parlé plus haut. Dès lors, suivant la remarque fort judicieuse de Thompson[1], le travail exécuté par l'agent mécanique se manifeste partie sous forme de chaleur, partie sous forme d'électricité. Si le corps est mauvais conducteur du mouvement calorifique, l'effet reste concentré à la surface; au cas contraire, il se propage à l'intérieur de la substance et se traduit pour le moins comme simple chaleur et souvent aussi comme tension et courant électrique; mais, lorsqu'on désire mettre en évidence ces dernières manifestations, il faut user d'artifices particuliers; par exemple, veut-on obtenir des effets de tension, on frotte des corps bien isolés; s'agit-il de constater les effets dynamiques, on attache à l'un des bouts du fil d'un rhéomètre un morceau de métal que l'on peut frotter avec une lime réliée à l'autre extrémité.

La manière la plus simple de réunir ces deux classes de phénomènes en un seul faisceau est de les envisager sous le point de vue où nous nous sommes placés. Lorsque, par voie mécanique, on met en mouve-

[1] Voy. Thompson, *Philosoph. Transact.*, 1856. On the dynamic qualities of metals. (Note de la p. 659.)

ment les particules d'un corps, il est impossible d'éviter que les molécules ne dépassent les limites de leurs vibrations naturelles, et alors l'agitation survenue dans la matière pesante se communique à l'éther intramoléculaire, lequel conçoit un mouvement vibratoire qui excède les limites de son élasticité naturelle. Par cela nécessairement l'équilibre intérieur est rompu, et il s'établit un transport d'éther qui s'effectue progressivement à travers les couches successives des corps. Lorsque la substance est isolante et ne livre pas passage à l'éther, nous avons une rupture d'équilibre des couches superficielles, donnant lieu à des pressions et à des vibrations; lorsque le corps est au contraire bon conducteur de l'électricité, l'éther peut circuler librement dans ses couches profondes, et on a le courant électrique continu. L'application à un corps de la chaleur fournie par une source étrangère suffit pour rompre l'équilibre de son éther intérieur; aussi la chaleur, indépendamment de toute action mécanique, est capable de développer des courants dont l'intensité varie avec les conditions de l'expérience. On fait à ce sujet dans les cours de physique une expérience bien connue. On forme un circuit avec des métaux hétérogènes, par exemple (fig. 26), les deux extrémités d'un barreau de bismuth *op* sont soudées à celles d'une lame de cuivre *m n*, puis on fait agir une source calorifique au niveau d'une des soudures; aussitôt l'équilibre électrique est rompu et un courant prend naissance, comme il est facile de le voir par la déviation d'une aiguille aimantée. Les phénomènes acquièrent leur intensité maximum avec des assemblages de bismuth et d'antimoine, de cuivre et de zinc, de fer et de platine, etc. Quand, au lieu de s'élever, la température des points de contact ou de soudure vient à baisser, il se produit encore un courant, mais en sens inverse du précédent. Dans ces expériences les métaux assemblés, avons-nous dit, doivent être hétérogènes. Ici le mot hétérogène est pris dans son

acception la plus étendue, car même en réunissant des métaux de même nature, quand l'un d'eux a éprouvé quelques modifications physiques dans sa structure moléculaire, le

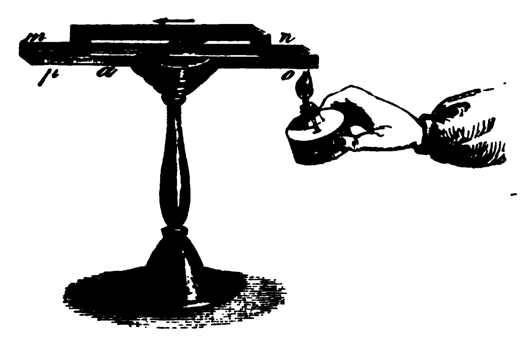


Fig. 26.

courant peut se développer. Magnus a montré que, dans les cas où les deux métaux réunis diffèrent seulement par les dimensions de leurs sections, on n'obtenait aucun effet électrique; donc, 1° le mouvement qui constitue ce courant se distingue de celui qui constitue la chaleur; 2° si la conductibilité des diverses substances métalliques exerce quelque influence sur les phénomènes, elle n'en est pas la cause efficiente, puisque une augmentation de la section, qui rend la conductibilité plus grande, n'est pas une condition suffisante pour le développement d'un courant thermo-électrique. Du reste, on arrive à la même conclusion en considérant que, dans le cas des métaux dissemblables, le courant ne marche pas toujours vers le meilleur conducteur; il est donc nécessaire de rattacher la véritable cause du phénomène aux conditions de la structure même des corps.

La direction du flux varie avec la nature des métaux; avec quelques-uns, le courant se dirige de la partie chaude à la partie froide (ex. : l'antimoine); dans d'autres, il

marche en sens inverse (ex. : bismuth). De plus, le sens du mouvement électrique ne reste pas constant, même entre métaux semblables, si ces derniers présentent des différences de structure intérieure suivant la direction des plans de clivage, au cas où ils sont cristallisés, etc. Si on prend un barreau de bismuth obtenu par fusion dans un moule dont le trou de coulée correspondait au centre du barreau, lequel point est placé entre deux clivages opposés, les deux moitiés du métal donnent un courant de sens contraire, et au niveau de la masselotte, il y a un point neutre (Svamberg)[1].

Enfin l'intensité de l'action électrique dépend de la direction relative des plans de clivage propres aux deux métaux ; ainsi deux morceaux de bismuth, taillés suivant des faces plus ou moins inclinées sur les plans de clivage naturels, étant assemblés, le courant minimum se développe lorsque les plans de clivage sont parallèles entre eux, et le courant maximum lorsqu'ils se coupent à angle droit, de telle sorte que la ligne axiale de l'un corresponde à la ligne équatoriale de l'autre[2]. Suivant Matteuci, dans les barres à clivage axial, le courant marche de la région chaude à celle qui est froide, et *vice versa* dans celles à clivage équatorial. Dans le fer, le magnétisme suffit pour déterminer le sens du courant.

Toutes les substances peuvent donner lieu à des manifestations électriques quand on leur a fait éprouver une modification moléculaire quelconque, soit en les comprimant, soit en les tordant ou en les étirant[3]. Dans les

[1] Svamberg, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. Paris, t. XXXI.

[2] Franz et de la Rive, *Traité de l'électricité*, t. III, p. 493.

[3] Voy. le grand travail de Thompson dans *Phil. Transact.*, 1856. ou *Electrodynamic qualities of metals*, p. 718. Il établit que, dans le fer, le courant va du fer ordinaire au fer doux à travers la partie chaude.

métaux maintenus à l'état de fusion, les courants thermo-électriques ne se développent pas (Matteuci).

D'après cela, les conditions qui déterminent la marche du courant dans un sens ou dans un autre, dépendent exclusivement de l'état physique du corps et de la distribution intérieure de ses molécules. Or cette distribution varie dans une même substance sous l'action de la chaleur. Nous avons dit précédemment que les axes des cristaux diaphanes peuvent changer de position; ainsi, dans quelques formes voisines du cube, à une certaine température, l'axe est la plus petite diagonale, et à une autre il est dirigé suivant la plus grande. Pour les substances métalliques la même chose a lieu certainement dans des limites beaucoup plus étendues, et cela nous permet d'expliquer le renversement de courant que l'on observe dans certains métaux : par exemple, le fer et le platine présentent un renversement de courant à la température de 380° (Becquerel).

L'intensité et la tension des courants thermo-électriques est de beaucoup inférieure à celle des courants électro-chimiques : résultat facile à prévoir, vu la très-grande conductibilité des éléments. On a reconnu que 150 couples de cuivre et bismuth équivalent à peine à un seul couple Daniell. Ces courants ne sont donc pas capables de surmonter la moindre résistance; aussi ne sortent-ils pas du système de corps au milieu duquel ils ont pris naissance; il se produit alors dans l'intérieur des métaux certaines pulsations électriques comparables aux mouvements de répercussion ou de remous que présentent les liquides renfermés dans des vases clos, avec des galvanomètres ordinaires, il est impossible de reconnaître la présence de ces mouvements électriques. Nous verrons plus tard d'autres exemples de courants intérieurs : qu'il nous suffise de dire pour le moment que ces courants permettent d'expliquer les phénomènes répulsifs d'origine calorifique

présentés par les cristaux de bismuth et de quelques autres corps sous l'influence du magnétisme. Cette question sera traitée dans tous ses détails en temps convenable.

La découverte des courants a permis de construire le thermo-multiplicateur (fig. 27), instrument qui permet d'évaluer les températures avec une délicatesse infiniment supérieure à celle de tous les thermoscopes antérieurement connus. D'un autre côté, l'étude de ces phé-

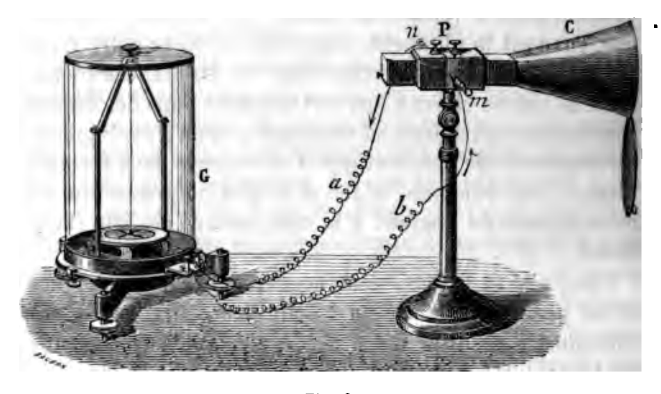


Fig. 27.

P, Pile thermo-électrique recevant les rayons d'un même faisceau calorifique par l'ouverture du cône C. — *m*, *n*, Bornes mettant la pile en communication avec les fils *a* et *b*. — G, Galvanomètre indiquant la présence du courant dans la pile et mesurant son intensité.

nomènes a montré que, dans toutes les substances, l'action d'une source calorifique quelconque *détermine non-seulement le mouvement thermique, mais encore un autre mode de mouvement qui, lorsque les conditions sont convenables, se traduit sous la forme de flux électrique extérieur, mais qui, dans tous les cas, s'établit dans l'intérieur de la substance elle-même.* Si le flux électrique prend telle direction et non toute autre, cela tient évidemment à ce que la

structure intérieure du milieu n'est pas la même dans les divers sens. Cette structure intime dépend immédiatement de la condition de la matière nommée arrangement moléculaire, expression de pure convention, ne l'oublions pas, car jusqu'à présent nous ignorons complétement en quoi consiste le fait physique qu'elle représente.

Une pile thermo-électrique, fonctionnant sous l'influence d'une radiation calorifique, nous donne l'exemple d'un mouvement vibratoire de l'éther qui, s'il traversait un corps diaphane, se propagerait par une suite d'ondes transversales, tandis que, dans le cas considéré, en se communiquant aux métaux de la pile, il s'est transformé au moins partiellement en courant longitudinal. Cette simple expérience nous montre de la manière la plus saisissante quelle part d'action revient à l'éther dans le développement du courant électrique. En effet, supposons un mouvement quelconque communiqué à un corps, la matière pondérable, comme la matière impondérable intramoléculaire sont mises en branle du même coup; et le mouvement est transmis soit par l'éther, soit par la matière pesante : s'il y a mouvement de l'éther, ce milieu peut vibrer transversalement ou présenter un mouvement ondulatoire longitudinal, car il est capable de ces deux modes de mouvement ; mais l'opacité des métaux nous apprend que les vibrations transversales y sont impossibles ; donc seules les ondes longitudinales pourront se développer. Si, au contraire, l'on dit que la force vive de la vibration incidente se communique toute entière à la matière pondérable, la conclusion précédente n'est pas invalidée, car l'éther recevra nécessairement une certaine quantité de la force vive qui anime les molécules de la matière grossière, ces dernières ne pouvant vibrer sans déterminer une certaine agitation du milieu qui les environne. De quelque façon que l'on se représente le mouvement oscil-

latoire de l'éther intérieur, on est forcé d'admettre un accroissement de l'amplitude des excursions moléculaires, et lorsque les vibrations exagérées des molécules dépassent les limites des forces élastiques[1], elles se trouvent dans le cas des ondes rompues, c'est-à-dire, donnent naissance à un véritable transport. Il se forme alors un flux dirigé dans tel ou tel sens, suivant la structure du conducteur au sein duquel naît le courant. Donc, ce que nous nommons courant électrique est un mouvement auquel participent la matière pesante et l'éther.

Jusqu'ici nous ne nous sommes pas prononcé sur la nature du courant, et nous n'avons pas opté en faveur de l'une ou de l'autre des deux hypothèses rivales, dont l'une regarde le courant comme un flux de matière pondérable extrêmement atténuée, et dont l'autre fait du courant un simple mouvement de l'éther interposé entre les molécules de tous les corps. Mais l'examen des phénomènes thermo-électriques nous permet d'asseoir notre opinion. Dans ces expériences, nous voyons une simple vibration lumineuse engendrer un courant; or il est difficile d'admettre qu'elle ait une puissance assez grande pour désagréger la matière pesante et la lancer à travers un fil conducteur malgré les résistances de tout genre qui s'opposent au transport. Aussi, à notre avis, la manière la plus rationnelle d'expliquer les choses consiste à dire que : *Le courant électrique est un mouvement de la matière impondérable au sein de la matière pondérable, et que dans un grand nombre de cas le flux de matière éthérée entraîne avec lui les molécules pesantes elles mêmes*. Ce courant se produit toutes les fois que dans la vibration moléculaire la limite d'élasticité est dépassée, ce qui dans les métaux arrive plus facilement que dans les corps diaphanes.

[1] Les forces élastiques sont ici entendues comme nous l'avons expliqué, d'après Lamé, dans le deuxième livre de cet ouvrage.

Dans le chapitre précédent, nous objections à ceux qui professent la matérialité du flux électrique que jamais on n'a surpris sur le trajet du courant des traces de pénétration de la matière, et que les rhéophores d'une pile, ni à leurs extrémités, ni dans leur partie moyenne, ne subissent de changement dans leur composition chimique, de sorte que si un transport de matière pondérable a lieu réellement, cela suppose à la matière une condition et des propriétés complétement différentes de celles propres à la matière pesante ordinaire : alors elle n'est autre que l'éther. Mais cette atténuation de la matière n'est pas démontrée par l'observation. Car l'expérience prouve que, dans ces phénomènes de transport, les substances conservent leur nature chimique. Il faut donc reconnaître que, dans les cas où la matière pondérable est détachée et transportée mécaniquement par l'impondérable, les vues exposées ci-dessus permettent d'expliquer sans difficultés sérieuses comment une action dynamique aussi faible qu'une vibration lumineuse est capable de rompre l'équilibre de la matière impondérable et de la chasser dans le circuit interpolaire. En un mot, dans ce cas, le problème est le même que celui qui consiste à expliquer le développement d'un courant qui prend naissance par une très-faible action mécanique comme on le voit, lorsque retournant bout pour bout un morceau de fer doux devant un aimant, un courant assez énergique se développe aussitôt. Comment croire que des actions mécaniques aussi peu intenses suffisent à séparer les molécules matérielles les unes des autres et à les lancer au travers d'un conducteur? Toute complication disparaît en faisant du courant un mouvement de la matière impondérable.

Nous pouvons citer, à l'appui de nos conclusions, certains faits analogues faciles à observer pendant la propagation des sons. Les vibrations sonores s'accomplissent

ordinairement de manière à ne pas dépasser les limites d'élasticité de l'air. Mais dans les violentes explosions, il se fait quelque chose qui ressemble à un véritable transport de la masse aérienne. On s'explique ainsi la propriété que possèdent la poudre et la nitroglycérine de lancer les corps au loin avec une extrême puissance. Dans le cas où le phénomène a une moindre intensité, lors de la détonation d'un pistolet par exemple, M. Regnault a constaté au début l'existence d'un véritable mouvement de translation, d'autant plus prononcé que l'explosion était plus violente.

On a reconnu également que la vitesse augmentait lorsque les sons étaient fort intenses, et lorsqu'on était voisin du centre d'ébranlement, qu'au contraire, elle présentait un ralentissement sensible dans les conditions inverses.

Enfin la propagation des mouvements au sein de l'eau nous offre des exemples encore plus palpables. Tel est le brisement des vagues de la mer, où le mouvement d'oscillation donne naissance à des courants de transport assez énergiques.

Mais l'agitation communiquée à l'éther n'est pas la seule considération à faire valoir pour expliquer la genèse du courant, il en est encore une autre.

Considérant l'extrême mobilité de l'éther au sein des bons conducteurs, on admet que cet impondérable doit être dilatable à un certain degré. L'éther est, en définitive une matière, et ses atomes n'échappent pas aux lois générales du mouvement, aucune différence de nature ne les sépare de ceux de la matière sensible ; probablement les premiers sont isolés et libres, tandis que les autres sont formés de plusieurs atomes simples. Supposons que l'agitation intérieure du milieu vienne à s'accroître, les atomes oscilleront suivant les courbes plus étendues, ils s'écarteront donc les uns des autres, d'où une véritable dilatation.

Cette augmentation de volume donnera forcément naissance à un transport d'éther, en d'autres termes à un courant. Ainsi tout s'explique sans qu'il soit nécessaire de supposer l'éther compressible, il suffit de le regarder comme un fluide ayant toutes les propriétés afférentes à cet état. Il est bien entendu que cette mobilité de l'éther appartient exclusivement aux corps bons conducteurs, et ne se rencontre jamais dans les substances isolantes.

L'hypothèse de la dilatabilité de l'éther n'est pas nouvelle; elle s'est imposée d'elle-même pour ainsi dire aux observateurs. Il est facile de voir comment tous les moyens dont nous disposons pour transformer la force vive moléculaire et la faire travailler, se réduisent à deux : la dilatation de la matière, spécialement des gaz, et le courant électrique. Dans le premier cas, lorsqu'on se sert d'une vapeur ou d'un gaz, tout se ramène à établir à l'aide de la dilatation un courant matériel de fluide, qui véritable véhicule de la force vive, l'absorbe en un point de son trajet pour la dépenser en un autre. Or, l'électricité agit de même, elle transporte la force vive moléculaire d'une section du circuit à une autre. N'avons-nous pas vu, en effet, que toutes les lois de l'écoulement des fluides conviennent à la ligne d'action de la force électrique, et que tous les phénomènes observés ne peuvent être expliqués en supposant une simple vibration longitudinale constituée par de petites oscillations analogues à celles du son. Mais dans les courants thermiques, aussi bien que dans ceux d'origine magnétique, le fluide en mouvement est-il exclusivement formé par les particules de la matière pondérable, conservant toutes leurs propriétés caractéristiques? Les expériences faites à ce sujet disent le contraire; reste donc l'hypothèse d'un flux de matière impondérable.

On nous objectera peut-être que si, dans un tube de Gassiot, un léger échauffement de la potasse vaporise une

quantité de matière assez grande pour livrer passage au courant, de même, sous l'influence d'une faible élévation de température, les molécules d'un métal s'atténuent considérablement et font irruption dans l'épaisseur du conducteur. La dissemblance entre ces deux ordres de phénomènes est palpable. Dans les tubes de Gassiot, l'élévation de température du verre, a vaporisé un peu de potasse ou d'acide, et les vapeurs transmettent le courant, mais l'action calorifique n'a pas engendré le courant, donc celui-ci a une autre origine. Deuxièmement, à l'intérieur de ces tubes la diffusion s'opère dans le vide; au contraire, dans les conditions que suppose l'hypothèse actuellement en discussion, il faut que les atomes matériels pénètrent les métaux et autres corps fort compactes qui, tout poreux qu'on les suppose, sont néanmoins des milieux résistants; et cependant, autre impossibilité, ces conducteurs résistants seraient traversés par le courant avec la vitesse prodigieuse de plusieurs milliers de lieues par seconde. Mais, dira-t-on, nous admettons que la chaleur détermine un déplacement des seules parties matérielles nommées atomes élémentaires; alors l'objection ne porte plus, car ces parties ne sont autres que les atomes éthérés. Donc, par voie d'exclusion, il reste prouvé, autant que faire se peut, que le courant est le flux de la matière éthérée renfermée dans tous les corps et nécessaire à leur constitution.

Nous trouvons un solide argument en faveur de nos idées dans le fait remarquable que les corps conducteurs du courant, sont précisément ceux au milieu desquels s'éteignent les mouvements vibratoires transversaux (les cas de décomposition étant exceptés); si bien que les corps se partagent en deux classes : 1° les diaphanes, au sein desquels l'éther peut vibrer; 2° les métalliques dont l'éther intérieur n'entre jamais directement en vibration lumineuse, de telle sorte que lorsqu'il est mis en mouvement l'agitation lui est communiquée par la matière pondérable

dont l'excitation préalable est indispensable. Car remarquons-le bien, l'existence de l'éther dans les métaux ne peut être mise en doute, puisqu'ils deviennent réellement transparents, lorsqu'ils sont amenés à l'état de feuilles très-minces; donc si dans leur condition ordinaire ils sont opaques, cela tient seulement à ce que le mouvement transversal des ondes lumineuses ne peut se propager; peut-être précisément à cause de l'extrême mobilité du milieu lui-même. En effet, nous avons vu que la structure des métaux permet aux molécules pesantes de se déplacer facilement, et il est absurde de prétendre que l'éther intra-moléculaire ne puisse jouir de cette même mobilité. Il n'est donc pas irrationnel d'admettre la possibilité d'un mouvement longtitudinal de l'éther dans les corps conducteurs et son impossibilité dans les isolants; ces derniers laisseraient par contre passer exclusivement les vibrations transversales. Les deux genres de mouvements peuvent avoir une origine commune, mais leur mode de propagation est dissemblable, car vibrer n'est pas couler. Considérés sous un autre point de vue, ces deux mouvements présentent encore des différences caractéristiques : le premier est réversible, et l'autre ne l'est pas. Les vibrations, sauf le cas de réflexion, ne reviennent jamais en arrière; un flux, au contraire, peut rétrograder, or nous citerons bientôt des exemples de véritables phénomènes de reflux dans le courant électrique. Le sens d'un courant est tantôt négatif, tantôt positif, et les effets observés varient avec le sens du mouvement : dans les mouvements vibratoires, il n'en est jamais ainsi.

Si la lumière consiste exclusivement en oscillations des atomes éthérés, sans aucune espèce de translation, ainsi que nous l'avons indiqué en parlant de la polarisation des rayons lumineux, les choses se comprennent encore mieux, et en admettant l'éther en équilibre, stable dans les corps diaphanes et instable dans les corps

opaques, on commence à reconnaître pourquoi les uns permettent la transmission des vibrations, et les autres, celle des courants. Grâce à cette hypothèse, une liaison remarquable apparaît entre les propriétés optiques et les manifestations électriques des corps, et d'autre part nous entrevoyons une certaine relation entre ces mêmes propriétés optiques et celles d'ordre chimique. En effet, deux corps étant mis en contact, l'action chimique rompt l'équilibre de l'éther intérieur, d'où, comme premier effet, apparition d'une certaine tension électrique à la surface des corps, puis, comme effet ultérieur, développement d'un courant. La chaleur agit d'une façon analogue, mais alors l'équilibre de l'éther est troublé par un effet d'expansion. En résumé, mieux que toutes les autres suppositions proposées pour atteindre le même but, celle qui regarde le courant comme un flux de matière impondérable, nous permet d'expliquer un très-grand nombre de faits, en même temps qu'elle établit un lien entre les propriétés les plus opposées en apparence. L'éther n'est plus un fluide destiné exclusivement à engendrer la lumière par ses vibrations; le cadre de l'hypothèse s'agrandit, et nous permet d'embrasser, dans une théorie simple et rationnelle, l'ensemble des phénomènes de la nature.

Envisagées de la sorte, les actions thermo-électriques sont relativement à l'éther des effets homologues de ceux produits par l'action de la chaleur sur une masse fluide renfermée dans un vase ayant ses diverses parties à des températures inégales. Supposons un cylindre horizontal de section constante renfermant un liquide chauffé en A et refroidi en C (fig. 28). Par effet de dilatation des mouvements se développent au sein de la masse dans tous les sens, mais si nous imaginons en B et D une dispo-

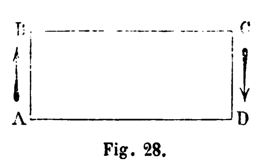


Fig. 28.

sition mécanique quelconque, valvulaire ou autre, telle qu'au point B le mouvement soit seulement possible de A en C, et au point D, de C vers A, évidemment un courant s'établira dans le sens ABCD et circulera aussi longtemps que durera l'application de la chaleur sans jamais changer de direction.

Les conditions toutes théoriques de cette expérience sont en réalité celles du thermosiphon et de plusieurs machines à vapeur dans lesquelles la même eau revient sans cesse dans la chaudière après s'être condensée dans un réfrigérant fermé.

Imaginons maintenant un cadre rectangulaire formé de métaux hétérogènes, chauffé en A et refroidi en B, ne reproduirons-nous pas sous une autre forme le système précédent ; seulement ici ce n'est point un liquide que entrera en mouvement, mais l'éther logé dans les intervalles des atomes métalliques (fig. 29). La chaleur trouble l'équilibre des atmosphères éthérées distribuées autour des molécules matérielles, un courant prend naissance et s'établit dans le sens de la moindre résistance.

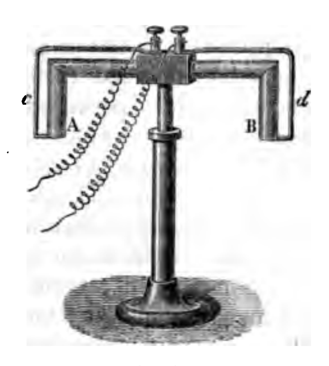


Fig. 29.

Dans notre cylindre, les soupapes déterminaient le sens du mouvement circulatoire à l'intérieur des métaux ; la structure moléculaire remplira les mêmes fonctions en laissant les molécules plus mobiles dans tel sens que dans tel autre.

On se demandera certainement en quoi consiste cet arrangement moléculaire, et comment, au point de vue

mécanique, on peut s'expliquer son influence sur les mouvements de l'éther.

Pour donner à nos idées une forme palpable, nous emprunterons aux enfants un de leurs jouets favoris; l'exemple, pour être familier, n'en sera pas moins instructif. Chacun de nous connaît la récréation enfantine qui consiste à construire un petit moulin avec quelques plumes fixées sur le contour d'une rondelle de bois, mobile autour de son centre, ayant soin de donner à chacune des ailettes une inclinaison convenable. En un mot, on forme une véritable hélice dextrorsum ou sinistrorsum, suivant la direction que l'on donne aux bras du moulin. Cela posé, supposons un nombre pair d'hélices de ce genre distribuées uniformément le long d'un même axe; mais sur une moitié de la longueur de l'axe les hélices sont dextrorsum, et sur l'autre elles sont sinistrorsum. En exposant cet appareil à un vent léger, toutes les hélices se mettront en rotation, seulement une moitié tournera dans un certain sens et l'autre en sens opposé. De telle sorte que si nous les supposons renfermées dans un tube au travers duquel nous pouvons faire passer un courant d'air, les ailettes opposeront une certaine résistance au mouvement de la masse gazeuse, et cette résistance sera la même, quelle que soit des deux ouvertures terminales du tube celle qui reçoit le courant. Mais supposons les hélices toutes de même nature et, de plus, imaginons qu'elles ne puissent tourner que dans une seule direction ou bien encore que, par un mécanisme particulier, elles soient animées d'un mouvement de rotation propre dans un sens déterminé. Évidemment la facilité avec laquelle nous pourrons lancer un courant d'air suivant l'axe de notre cylindre ne sera pas la même en introduisant le gaz par une extrémité ou par l'autre, la résistance sera maximum lorsque le mouvement du flux gazeux contrariera la rotation des hélices, et minimum dans le cas contraire.

La comparaison à laquelle nous avons eu recours est fondée sur un jeu d'enfant, et cependant elle mérite d'être prise en considération, car la nature travaille toujours de même et suit constamment les mêmes lois dans les phénomènes les plus compliqués de notre existence et dans nos récréations les moins sérieuses.

Inutile de faire ressortir les analogies entre les faits que nous venons de signaler et ceux que nous nous proposons d'éclaircir; le lecteur nous a devancé. Dans les corps solides les molécules sont diversement conformées, et, à cause de cela, leurs moments d'inertie sont inégaux. La facilité avec laquelle elles entreront en rotation dépend du sens de ce mouvement. De plus, les molécules des corps cristallisés étant orientées dans une direction fixe, la résistance qu'elles présenteront à la propagation d'un flux envahissant le milieu solide, varie avec la direction du courant. Les corps sont-ils amorphes? La non-homogénéité de la masse, la condensation inégale des molécules dans les divers sens, expliquent suffisamment pourquoi, suivant une direction donnée, le courant est plus difficilement transmis que suivant toute autre. En outre, les molécules étant en rotation leurs axes présentent nécessairement une orientation plus ou moins régulière.

Lorsque nous avons étudié les corps diaphanes cristallisés, nous avons vu combien était grande l'influence sur leurs propriétés de tous les éléments ayant une relation quelconque avec la structure cristalline; il est donc naturel de croire qu'il en est de même pour les substances métalliques. Supposons que deux métaux étant mis en contact, on vienne, par l'action de la chaleur, à troubler l'équilibre de l'éther interstitiel. Toutes les molécules matérielles ne céderont pas avec une égale facilité au flux éthéré qui se développe progressivement, et le courant rencontrant une moindre résistance dans un certain sens, la

circulation électrique prendra une direction parfaitement définie.

Lorsque l'agitation extérieure devient assez puissante pour se propager au loin et donner naissance à un courant intérieur, si ce dernier rencontre un système moléculaire en rotation dirigé de telle façon que son mouvement soit contrarié par le flux éthéré, la vitesse des molécules sera tout d'abord diminuée, puis elle pourra changer de signe. En même temps la force vive du courant et la vibration moléculaire de la masse traversée éprouvent un notable affaiblissement. Donc quelquefois un courant pourra abaisser la température naturelle des molécules, lorsque sa direction se trouvera être contraire à celle de leurs rotations.

Telle est assurément l'explication d'un fait remarquable découvert par Peltier: il a constaté que le même courant échauffe un fil en le traversant dans un sens, et le refroidit lorsqu'il marche en sens opposé; dans la seconde partie de l'expérience, la force vive du courant est employée à détruire et à renverser les mouvements rotatoires des molécules du métal. Le fait que nous rappelons ici est comparable à celui des interférences, mais le principe en est tout différent. Pour faire descendre la température au-dessous de celle ambiante, il faut employer des courants de faible tension, circonstance qui confirme l'explication précédente. Avec des courants énergiques, quelle qu'en soit la direction, on observe un effet thermométrique positif, mais il ne conserve pas la même valeur. Par exemple, avec un courant passant du fer au zinc, la température atteint 30°; la propagation se fait-elle du zinc au fer, le thermomètre tombe à 13°; lorsque le courant passe du bismuth au cuivre, on a une variation thermométrique de — 4°, et de 50° pour la direction contraire. Tous les métaux donnent lieu à des phénomènes du même genre; mais en

employant un barreau de bismuth, d'antimoine, le refroidissement est très-marqué : il atteint 20°.

Les courants thermo-électriques des métaux ont comme corrélatifs les effets de tension qui se manifestent sous l'action de la chaleur dans les cristaux électriques, tels que la tourmaline, la boracite, la topaze, le sucre, etc. Nous rappellerons succinctement ces expériences, car elles confirment notre dire, à savoir que la direction du mouvement électrique dépend de la condition moléculaire. Les cristaux thermo-électriques proprement dits présentent simultanément les deux états électriques opposés, et ils sont tous d'une telle configuration, que leurs extrémités ou pôles présentent des formes dissemblables. Les cristaux parfaitement symétriques et égaux dans toutes leurs parties ne donnent qu'une seule espèce d'électricité (Pianciani), probablement due à des actions chimiques ou à l'évaporation.

Cette dyssymétrie dans la forme nous apprend que la distribution de l'éther à l'intérieur des cristaux n'est pas égale dans tous les sens. Telle a été déjà notre conclusion lorsque, étudiant l'optique, nous avons vu le plan de polarisation dans le quartz tourner à droite ou à gauche, suivant la direction des faces plagiédriques.

La distribution inégale de la matière pesante dans la masse du cristal contribue puissamment à imprimer une direction définie au mouvement des atomes éthérés, après la rupture de leur équilibre. Dans les cristaux et dans les métaux la non-homogénéité de structure agit de même, d'où cette règle générale : *Les causes qui déterminent les courants dans les métaux produisent la tension électrique sur les corps isolants.*

Par une étude plus attentive des formes cristallines, on apprendra à reconnaitre quels sont les divers éléments du problème, pourquoi avec certains cristaux le courant marche de la partie chaude à la partie froide, tandis que,

avec d'autres, la direction est contraire. En un mot, il reste à faire au sujet des substances électriques par la chaleur le travail qui a été si heureusement poursuivi en optique sur les cristaux diaphanes. Déjà quelques faits intéressants sont acquis à la science. Récemment encore on croyait que le bismuth cristallisait en cubes, et il était fort difficile de comprendre comment il pouvait présenter une structure irrégulière. Il est démontré aujourd'hui que la forme cristalline de ce métal est un rhomboèdre très-voisin du cube ; dès lors le développement des courants d'origine calorifique se comprend, car toutes les conditions physiques qui déterminent une inclinaison du clivage dans un certain sens, contribuent à mettre l'éther intérieur en mouvement suivant une direction définie.

Dans un cristal isolant, l'agitation de l'éther est en rapport intime avec les phases du mouvement moléculaire thermique; par conséquent, elle subit de grandes variations selon que la température est en période d'augmentation ou de décroissement, si bien qu'à une même extrémité l'état électrique du cristal change de signe quand, au lieu de s'élever, la température s'abaisse.

Les propriétés de la tourmaline vérifient cette induction. Cette pierre prend effectivement une électricité différente selon que sa température monte ou descend. Au moment où s'effectue le changement de signe électrique, le cristal semble naturel ; mais on saisit facilement toute la différence entre un tel état neutre et celui qui est l'indice d'une absence complète de modifications intérieures. On aurait donc grand tort de juger de l'état naturel absolu des corps isolants d'après leur neutralité apparente.

Les phénomènes de tension que manifestent les cristaux thermo-électriques présentent sous certains rapports d'étroites analogies avec ceux que nous observons dans les électro-moteurs chimiques. Les deux pôles d'une pile sont, avons-nous dit, électrisés contrairement lorsque le circuit

n'est pas fermé, et le courant prend naissance aussitôt après la réunion des pôles. La seule différence, c'est que nous n'avons pas dans un cristal la faculté d'établir ou non le courant, car le cristal est par sa nature conducteur ou isolant.

En résumé, les systèmes formés de substances électrisables par la chaleur sont de véritables électro-moteurs thermiques, de même que les piles voltaïques ordinaires sont des électro-moteurs chimiques. Dans les premiers, le mouvement électrique résulte de l'agitation de l'éther, de son déplacement produit par le mouvement vibratoire qui excède les limites de l'élasticité du fluide et peut-être encore de sa dilatation; dans les autres, il prend naissance par suite de la distribution de l'éther en nouvelles atmosphères moléculaires au moment où les deux corps en présence, réunissant leurs molécules, forment un nouveau composé. De plus, considérant que dans toute genèse de courant la chaleur prend une part considérable au phénomène, il nous semble indispensable d'admettre que même dans les courants d'origine chimique, le flux est dû en très-grande partie à ces vibrations excessives qui sont la source de la rupture de l'équilibre et, par suite, de la translation de l'éther. Le sens des courants thermo-électriques dépend de la structure des circuits en vertu de laquelle ceux-ci livrent passage à l'éther dans telle direction plus facilement que dans telle autre, et à cette inégalité de résistance intérieure ne sont point étrangers les mouvements rotatoires des molécules dont l'orientation est variable comme nous le prouvent les diverses figures des cristaux. Dans le cas des courants chimiques, le sens du mouvement semble dépendre principalement de la quantité différente d'éther qui constitue l'atmosphère enveloppant chacune des molécules du conducteur.

La tension statique des cristaux ne suppose pas une translation de matière pondérable; elle s'effectue par un

simple déplacement de l'éther s'établissant de molécule à molécule en tout comparable à l'induction des corps isolants. D'où ces deux conséquences :

1° Dans les mauvais conducteurs le mouvement de transport de l'éther est impossible, ce fluide ne pouvant circuler librement comme il le fait dans les métaux. Il résulte de cela que le principe fondamental de l'égalité de la pression de l'éther dans tous les sens à l'intérieur des corps ne peut plus être admis; il faut supposer que dans les couches successives du milieu les atomes éprouvent un très-léger déplacement; tous ces mouvements locaux et très-petits donnent une résultante finie à l'extérieur, laquelle constitue la tension électrique. Cette tension ne peut guère se résoudre autrement qu'en une vibration plus énergique, et une augmentation ou une diminution de la densité de l'éther qui reste dans le corps.

2° Quand un cristal s'électrise, on ne peut affirmer que la tension soit produite par un changement d'équilibre de la matière pondérable du solide; ce défaut de certitude est favorable à nos idées sur la nature éthérée du courant, car il nous autorise à penser que, dans le développement d'un courant électrique au sein d'un bon conducteur, il y a autre chose que la mise en mouvement de la matière grossière. Ce transport peut exister, à la vérité, mais seulement lorsque des molécules sont détachées par la violence du flux éthéré. Les choses étant envisagées de la sorte, tous les phénomènes deviennent explicables; tandis qu'au contraire, dans la plupart des cas, l'esprit se refuse à admettre un flux de molécules pesantes. Est-il possible en effet de donner une telle origine au courant lorsqu'on voit, par exemple, les courants thermo-électriques excités par une simple vibration lumineuse, et les courants magnéto-électriques produits par le seul renversement d'un aimant. Inutile d'ajouter que l'on n'a jamais constaté les moindres traces de transport molécu-

laire dans les conducteurs traversés par ces courants. Le courant ne traverse ni le vide ni les milieux diaphanes, ou du moins dans ceux-ci le courant ne passe qu'avec la plus grande difficulté et en les décomposant partiellement. Pendant longtemps cette faculté isolante du vide s'est présentée à nous comme une sérieuse difficulté, et cependant elle est bien selon la nature des choses. En effet, ce que nous appelons vide n'est que l'éther homogène, et dans une masse fluide de densité partout uniforme un courant ne peut prendre naissance : supposons un ébranlement de la masse en un point quelconque de son étendue, il produira une vibration rayonnante s'étendant de tous côtés, mais jamais un courant, qui suppose essentiellement une variation relative de densité ou de pression dans les diverses parties du fluide. Etablissons donc deux classes de milieux : les uns admettent de préférence les mouvements transversaux de l'éther, les autres se laissent traverser principalement par les mouvements longitudinaux.

Concluons : *le courant est un mouvement de translation de la matière impondérable s'effectuant au travers de la matière pondérable dont quelques molécules sont parfois entraînées par le flux éthéré.*

Les choses étant entendues de la sorte, nous dirons souvent et avec justesse courant éthéré au lieu de courant électrique; néanmoins, conformément aux remarques faites dans le livre I, chap. II, le mot électricité sera conservé, et ce ne sera pas sans avantages. Ne savons-nous pas que la pression barométrique, le son, le vent, sont des modes de mouvement propres à un même fluide, l'air, et qu'il est cependant fort utile de donner à chacun de ces phénomènes un nom spécial; de même il est convenable de continuer à distinguer l'éther à l'état de tension de l'éther à l'état de courant, en maintenant

les anciennes dénominations. Déjà au sujet des vibrations transversales de l'éther, ces réflexions nous avaient arrêté quelques instants, et nous avions reconnu l'utilité des deux termes : radiations calorifiques et radiations lumineuses, employés concurremment, chacun ayant une acception différente.

CHAPITRE VII

PROPAGATION DE L'ÉLECTRICITÉ DANS LES CORPS. — RÉSULTATS FOURNIS PAR L'ÉTUDE DES TRANSMISSIONS TÉLÉGRAPHIQUES.

Les corps se partagent en deux grandes classes : les isolants et les bons conducteurs ; en outre, certaines substances ne présentent qu'une conductibilité imparfaite, ce qui tient, soit aux impuretés qu'elles renferment, soit à ce qu'elles sont mélangées à des liquides d'une facile décomposition. Citons comme exemples les corps à moitié vitreux et métalliques et les substances organiques. Le pouvoir isolant ou conducteur ne dépend nullement de la nature chimique, mais de l'état d'agrégation moléculaire. Ainsi le carbone, soit amorphe, soit graphitoïde, conduit l'électricité, et à l'état de diamant il n'a plus cette propriété. A quelques exceptions près, on peut poser comme une grande loi physique que les meilleurs conducteurs sont les métaux et que les corps parfaitement isolants sont les verres, les résines et les pierres précieuses.

Nous avons signalé plus haut (p. 278) entre les propriétés électriques des corps et leur mode d'action sur la lumière ; des similitudes telles que dans les deux cas les phénomènes paraissent dus à la même cause sous des modalités différentes. La distinction des corps en isolants et en conducteurs est parallèle à celle déjà établie précédemment entre les matières qui font éprouver à la lu-

mière la polarisation rectiligne et celles qui la polarisent elliptiquement.

Les types caractéristiques de nos séries sont les corps diaphanes pour les isolants, et les métaux pour les conducteurs : aussi les dénominations corps vitreux [1] et corps métalliques désigneront collectivement les substances appartenant à l'une et à l'autre des deux grandes classes dont nous avons parlé. Ces mots seront pris avec leur acception la plus large, car parmi les diaphanes nous compterons des substances qui rendues opaques par leur mélange avec quelque matière étrangère n'en sont pas moins de nature vitreuse ou résineuse, et de même parmi les métaux nous rangerons tous les composés minéraux qui en ont l'aspect et les propriétés.

Les expressions précédentes seraient très-avantageusement remplacées par d'autres plus générales, mais nous ne voulons pas essayer du néologisme ; toutefois il importe de ne pas se méprendre sur le contraste que nous caractérisons ici. Par exemple, l'or, l'argent, ne cessent pas d'être conducteurs alors qu'ils sont amenés à l'état de feuilles assez minces pour être transparentes. Cependant, sous cette forme, ils opposent une grande résistance au mouvement électrique, et plusieurs physiciens distingués les placent au nombre des demi-conducteurs. Le verre chauffé au rouge perd sa transparence, mais devient conducteur. D'un autre côté les corps doués du pouvoir d'isolation le plus complet, se laissent toujours pénétrer un peu par l'électricité et la transmettent en petite quantité dans leur masse.

On s'explique par là comment un condensateur chargé n'est jamais ramené à l'état naturel du premier coup, et donne plusieurs étincelles d'intensité décroissante ; comment aussi la lame isolante d'un condensateur est percée

[1] Vitreux nous semble préférable à diaphane, parce que de nombreuses substances isolantes sont opaques, exemple les verres noirs.



seulement avec des conducteurs ayant une longueur considérable. Les fils télégraphiques ont permis d'entreprendre des recherches sur une vaste échelle et, de plus, au grand avantage de la science, la pratique journalière de la télégraphie a révélé des faits très-importants. Résumons les faits les plus utiles à notre sujet, et, avant tout, définissons la vitesse de l'électricité.

La vitesse de l'électricité est mesuré par l'espace que parcourt en l'unité de temps sur un fil conducteur une action de nature électrique susceptible de produire un effet déterminé. Une telle définition paraîtra probablement un peu vague, mais pour l'instant nous ne pouvons être plus explicite.

Quelquefois l'effet obtenu est une étincelle électrique, ou la déviation d'une aiguille aimantée, ou l'aimantation d'un fer doux. Ainsi qu'un fil très-long, mettant en communication les deux armures d'une bouteille de Leyde, présente deux solutions de continuité, l'une au milieu et l'autre voisine du bouton, on constate une différence entre les instants où l'étincelle éclate dans ces deux points (Wheaststone); on arriverait à des résultats analogues en introduisant dans un même circuit, soit deux appareils télegraphiques, soit deux galvanomètres, l'un très-voisin de la pile et l'autre très-éloigné. On peut avoir aussi recours à une décomposition chimique opérée dans des voltamètres échelonnés à de grandes distances les uns des autres; on voit l'électrolyse ne pas commencer au même instant dans chacun des appareils. Quelle que soit la méthode suivie, d'après le temps écoulé entre les manifestations d'un même effet électrique en deux points séparés par une distance connue, on pourra calculer la vitesse de l'électricité.

Plusieurs expérimentateurs ont traité le problème de la vitesse de l'électricité, mais les valeurs obtenues sont notablement divergentes. Wheatstone déchargeant une

lorsque la charge de l'appareil surpasse une certaine limite, et enfin pourquoi cette même lame présente, après plusieurs décharges, une sorte de désagrégation et de décomposition dans ses couches superficielles.

Au livre II, chap. VIII, nous avons indiqué comment l'action des métaux sur la lumière suppose une certaine mobilité de leurs molécules qui est la cause déterminante de l'extinction rapide des rayons : actuellement, nous voyons que cette mobilité n'est pas spéciale à la matière pondérable, mais elle se rencontre développée à un haut degré dans les molécules de la matière impondérable, et l'on arrive à se demander si la polarisation elliptique ne serait pas un effet de la mobilité des atomes éthérés.

Avant de chercher les conditions de structure qui font d'un corps un isolant ou un conducteur, il importe d'étudier les lois de la propagation du mouvement électrique à l'intérieur des corps. Nous serons à même ensuite de vérifier les conclusions du chapitre précédent et nous acquerrons des renseignements utiles pour éclairer la nature du mouvement électrique.

Le passage de l'électricité dans les conducteurs présente deux phases distinctes; savoir : l'état initial, alors que le mouvement commence dans le conducteur, et l'état définitif, quand le flux électrique continue à traverser le conducteur. Les phénomènes considérés précédemment avaient tous rapport à l'état définitif, il faut maintenant examiner les particularités de l'action du courant à l'état initial ; disons, par avance, que les faits dont nous allons parler sont très-propres à dissiper les quelques doutes que l'on pourrait avoir encore sur la nature du courant.

Il était réservé aux physiciens modernes de faire une semblable étude, car l'électricité se propageant avec une vitesse incroyable, les expériences étaient possibles

seulement avec des conducteurs ayant une longueur considérable. Les fils télégraphiques ont permis d'entreprendre des recherches sur une vaste échelle et, de plus, au grand avantage de la science, la pratique journalière de la télégraphie a révélé des faits très-importants. Résumons les faits les plus utiles à notre sujet, et, avant tout, définissons la vitesse de l'électricité.

La vitesse de l'électricité est mesuré par l'espace que parcourt en l'unité de temps sur un fil conducteur une action de nature électrique susceptible de produire un effet déterminé. Une telle définition paraîtra probablement un peu vague, mais pour l'instant nous ne pouvons être plus explicite.

Quelquefois l'effet obtenu est une étincelle électrique, ou la déviation d'une aiguille aimantée, ou l'aimantation d'un fer doux. Ainsi qu'un fil très-long, mettant en communication les deux armures d'une bouteille de Leyde, présente deux solutions de continuité, l'une au milieu et l'autre voisine du bouton, on constate une différence entre les instants où l'étincelle éclate dans ces deux points (Wheaststone); on arriverait à des résultats analogues en introduisant dans un même circuit, soit deux appareils télegraphiques, soit deux galvanomètres, l'un très-voisin de la pile et l'autre très-éloigné. On peut avoir aussi recours à une décomposition chimique opérée dans des voltamètres échelonnés à de grandes distances les uns des autres; on voit l'électrolyse ne pas commencer au même instant dans chacun des appareils. Quelle que soit la méthode suivie, d'après le temps écoulé entre les manifestations d'un même effet électrique en deux points séparés par une distance connue, on pourra calculer la vitesse de l'électricité.

Plusieurs expérimentateurs ont traité le problème de la vitesse de l'électricité, mais les valeurs obtenues sont notablement divergentes. Wheatstone déchargeant une

bouteille de Leyde à travers un fil métallique suspendu par des cordons de soie dans une longue galerie et repliées en parties parallèles, déterminait le temps écoulé entre la manifestation des étincelles extrêmes et l'apparition de celle du milieu; il trouva une vitesse de 461 000 kilomètres par seconde. Fizeau et Gounelle étudiant la vitesse du courant voltaïque dans les fils télégraphiques, obtinrent comme résultat 180 000 kilomètres et de plus ils remarquèrent qu'il se produisait une espèce de réflexion dans l'intérieur du fil. Walker et Mitchell hésitent entre 40 000 et 45 000 kilomètres. Enfin d'une série d'expériences entreprises sur le câble qui traverse la Manche, on conclut que la vitesse était seulement de 4 300 kilomètres. Une telle discordance entre les résultats fournis par divers observateurs ne pouvait être attribuée à l'influence de la matière des conducteurs ou aux erreurs d'observation. Aussi en rechercha-t-on les causes. Une étude sérieuse de la question apprit que dans toutes ces expériences il fallait distinguer deux choses bien distinctes : 1° le temps employé par le conducteur à acquérir une tension telle qu'il soit capable de produire un effet déterminé, par exemple une étincelle, une attraction, une décomposition chimique; 2° le temps nécessaire à la pulsation, c'est-à-dire onde électrique, ou, si l'on veut encore, aux molécules éthérées pour parcourir une longueur de fil donnée. Or les observateurs ne peuvent que saisir le moment où il est possible au fluide de signaler son passage; il ne leur est donc seulement permis que de résoudre la première partie du problème; la seconde subsiste toute entière et sa solution ne sera pas la même suivant la théorie acceptée pour expliquer le mouvement électrique.

La diminution de vitesse éprouvée par le courant en traversant les câbles sous-marins tient évidemment à des phénomènes d'induction. En effet, un fil submergé se

charge comme une véritable bouteille de Leyde; le fil de cuivre représente l'armure intérieure, la gutta percha est le corps isolant intermédiaire, enfin l'enveloppe protectrice en fer et l'eau de mer environnante tiennent lieu d'armure extérieure. Par conséquent, le fil, pour prendre dans toute sa longueur une tension susceptible de produire un effet voulu, emploiera un certain temps; de même que nous voyons une machine électrique charger une plaque conductrice libre plus rapidement que la feuille d'étain d'un carreau fulminant, les deux surfaces ayant d'ailleurs une égale étendue.

Ces observations confirment la remarque déjà faite par Volta qu'une pile met quelques instants à charger une batterie, d'où il conclut que la nouvelle source électrique trouvée par lui, malgré sa grande abondance, ne produit qu'une quantité limitée d'électricité dans un temps donné. M. Latimer Clark, ayant mis un fil télégraphique souterrain, long de 1490 milles, en relation avec trois galvanomètres, un au milieu et les deux autres aux extrémités, fit passer dans la ligne un courant de 500 couples; il vit les aiguilles se déplacer l'une après l'autre, la plus éloignée plus tardivement que celle qui était voisine de la pile, et il observa même une différence supérieure à une seconde; mais la différence fut inappréciable en expérimentant sur un fil aérien [1]. De plus, sur les galvanomètres du milieu et de la fin les aiguilles se mouvaient lentement, tandis que, dans le premier, il se produisait une brusque déviation au moment de la fermeture du circuit de telle sorte que si, à l'aide d'un mécanisme réglé par un pendule, on ouvrait et on fermait le circuit de seconde en seconde à l'extrémité du fil, la discontinuité du courant était complétement effacée, et il sortait du fil un flux con-

[1] Voy. *Report of the joint committee for the submarine telegraphe*, London, 1862, p. 304 et 305.

tinu. Le fil a joué dans ce cas le rôle d'un grand récipient régulateur à l'aide duquel on uniformisait le cours irrégulier et intermittent du fluide. De là sont venues de sérieuses difficultés dans la transmission des signaux au moyen des câbles sous-marins et la nécessité de tenir le fil toujours plein, c'est-à-dire de ne le jamais décharger complétement.

Tous ces faits nous apprennent que si dans les recherches sur la vitesse de l'électricité, entreprises jusqu'ici par divers observateurs, les résultats obtenus sont très-différents les uns des autres, ces divergences tiennent uniquement aux phénomènes d'induction qui s'établissent entre les fils et les corps environnants. Dans les expériences, on ne peut jamais éviter les effets de condensation; de plus, ils varient avec la nature des milieux traversés par les fils; par conséquent, comme tous les observateurs n'ont pas expérimenté dans des conditions semblables, il leur a été impossible de trouver des résultats comparables.

Donc nous ne connaissons pas encore la vitesse réelle de l'onde éthérée dans l'intérieur d'un fil. M. Hughes, très-connu dans l'art de la télégraphie, a observé qu'en employant des appareils extrêmement délicats, on obtient des signaux avec une rapidité d'autant plus grande, que les machines sont plus sensibles, et il en conclut que la transmission serait instantanée si le conducteur était absolument libre; d'autres physiciens ont émis la même opinion en se fondant sur les faits observés par Wheatstone. Cette conclusion est réellement inadmissible, et il nous semble beaucoup plus rationnel d'admettre avec M. Marié-Davy que la vitesse de l'électricité est identique à celle avec laquelle se propage une pression dans l'éther libre, c'est-à-dire à la vitesse de la lumière[1]. Cette conclusion est con-

[1] Voy. Marié-Davy, *Recherches sur l'électricité considérée au point de vue mécanique*, p. 61.

firmée par les dernières observations des physiciens anglais. D'après M. Marié-Davy, la valeur assignée par Wheatstone à la vitesse de l'électricité ne doit pas être rejetée, parce qu'elle est supérieure à celle de la lumière, car on pourrait la réduire à ce nombre sans dépasser les limites des erreurs possibles. De plus, cette seule considération ne saurait nous décider à repousser le chiffre des savants anglais, aujourd'hui que les expériences de Quinke ont appris que la lumière se propage plus rapidement dans les métaux que dans le vide.

La théorie, d'accord avec l'observation, nous montre que dans les conducteurs ordinaires le courant ne parvient pas instantanément au maximum de son intensité sur toute la longueur du fil, mais qu'au contraire il y arrive peu à peu ; si par exemple un télégraphe électrochimique de Bain communique avec un fil souterrain d'une assez grande longueur, on observe que le trait marqué par le style au moment de l'arrivée d'un courant est d'abord très-grêle, et augmente graduellement de largeur, il se présente ainsi a ——— b. Inversement, lors de la cessation du courant, le trait ne se termine que graduellement en diminuant d'épaisseur a' ——— b'. Supposons trois galvanomètres intercalés dans un fil de ligne, un à chacune des extrémités et l'autre au milieu, puis le fil ayant été chargé, on me au même instant ses deux bouts en communication avec la terre, on voit que les galvanomètres extrêmes sont aussitôt déviés, mais celui du milieu ne se met en mouvement que quelques instants après. Cette expérience prouve que le conducteur se décharge dans le sol par ses deux extrémités à la fois, et voilà pourquoi dans la pratique de la télégraphie, lorsqu'on rompt la communication d'une pile avec un fil, on met aussitôt l'extrémité par où entrait le courant en rapport avec le sol, afin de ramener le fil plus promptement à l'état naturel.

Les diverses expériences citées jusqu'ici, ne nous font donc pas connaître la vitesse de l'électricité, mais seulement combien il faut de temps à un fil d'une longueur déterminée pour arriver à une certaine tension; elles nous apprennent de plus que le courant peut se propager dans une direction contraire à celle de la charge initiale. Plusieurs géomètres éminents ont appliqué le calcul à la recherche de la loi suivant laquelle croît la tension d'un courant. Leurs conclusions ont été les suivantes : la courbe représentative de l'intensité d'un courant n'est pas la même au commencement et à la fin; en outre, lorsque le circuit restant fermé le flux électrique est continu, on a dans le fil une tension asymptotique *a b c* (fig. 30) que l'on peut regarder comme sensiblement constante. Le courant éprouve-t-il une courte interruption, il se produit dans le fil une sorte d'onde ayant la forme *m n p* (fig. 30); si le fil est très-long et si l'onde éprouve un retard par effet d'induction, les ondes s'aplanissent et se confondent les unes avec les autres, de telle sorte qu'à la sortie du fil elles produisent un courant continu, bien qu'elles se soient développées isolément. Ces conclusions ont été vérifiées expérimentalement.

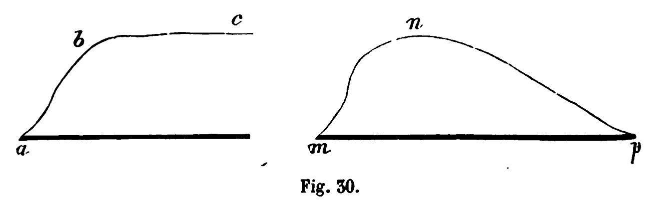


Fig. 30.

Il est difficile, pour ne pas dire impossible, d'expliquer ces phénomènes par l'assimilation du courant à un simple mouvement vibratoire; toute difficulté disparaît, au contraire, en le regardant comme un transport de fluide. Et

dans cette hypothèse, lorsqu'on veut s'expliquer les effets du courant électrique, il suffit d'analyser comment les choses se passent dans les cas analogues de l'écoulement des fluides matériels.

Supposons (fig. 31) un réservoir R constamment plein d'eau, communiquant avec un canal A B, ayant une section

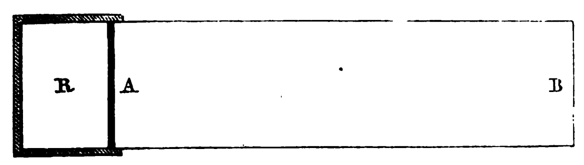


Fig. 31.

rectangulaire et des parois verticales de même hauteur que celles du réservoir. Le canal présente deux vannes, l'une A à la jonction du canal avec le récipient, l'autre B à l'extrémité opposée. Trois cas peuvent se présenter : 1° l'ouverture B étant libre et la vanne A fermée, le canal est vide. Si alors on soulève la vanne A, l'eau se précipite dans le chenal avec une vitesse proportionnée à la charge et forme un *front b* (fig. 32), dont la hauteur dépend d'abord de la résistance des parois et du fond, ensuite de la largeur de la coursière[1]. Ce premier temps de l'écoulement est dit l'état initial du mouvement dans le canal.

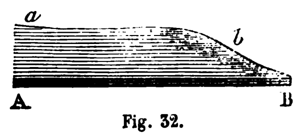


Fig. 32.

On comprend que si la section du canal est partout la même et égale à l'ouverture d'admission, le temps que met le bief à se remplir est indépendant de sa lar-

[1] On observe de beaux exemples de *front* présenté par une masse liquide, lorsqu'un torrent vient à déborder, ou bien encore lorsque les vagues de la mer se soulèvent dans un couloir. Toutes ces comparaisons sont empruntées en grande partie à M. Marié-Davy.

geur. Dans le cas où, au contraire, le bief présente des étranglements et des renflements, il se produit des remous, et il se remplit plus tentement (Venturi). A cet état variable succède un écoulement continu. Dans ce premier cas, le mouvement initial présente le même sens que le courant définitif, et arrive avec le front de l'onde à l'orifice libre du canal en même temps que l'eau qui tout à l'heure se trouvait au niveau de l'ouverture du récipient.

2° Supposons maintenant l'orifice de décharge B fermé, et celui d'admission A ouvert, le bief sera plein; on soulève alors la vanne B; le liquide s'écoule aussitôt, en même temps une onde se forme à la surface de l'eau du canal, et se propage à raison d'une fraction de mètre par seconde, c'est-à-dire avec la vitesse de transmission des ondes au sein d'une eau tranquille. Mais ici le sens du mouvement ondulatoire développé à la surface de la masse fluide dans le premier instant de l'écoulement, est contraire à celui du flux, définitivement établi, lequel flux a commencé à s'établir au niveau de l'orifice de décharge et s'est propagé dans le canal des parties les plus éloignées vers le réservoir. Enfin, il est évident que la forme de la surface libre de l'eau pendant l'état variable ne sera pas le même dans ce deuxième cas que dans le premier.

3° Enfin, on peut imaginer que le bief étant rempli, et l'eau ayant un écoulement uniforme, on sépare complétement le canal du réservoir, les orifices A et B restant ouverts; l'eau s'échappera par les deux extrémités à la fois, et le bief se videra. Comme toute la masse liquide était primitivement animée d'un mouvement de translation dans une direction déterminée, à l'une des extrémités de la masse ce mouvement devra changer de sens, et la couche supérieure du liquide ne présentera pas la même configuration, dans la partie *a* (fig. 33), voisine de A, et dans

celle *b*, voisine de l'ouverture B. Si l'eau avait été primitivement en repos dans le canal, elle se serait déchargée également des deux côtés.

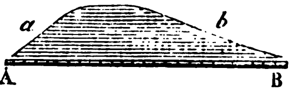


Fig. 33.

Ces trois cas particuliers de l'écoulement du liquide contenu dans un canal nous donnent une idée très-juste de ce qui arrive lorsqu'une pile est mise en communication avec un long conducteur. Le premier nous montre comment les choses se passent dans un fil dont l'extrémité la plus éloignée est en communication avec le sol. Le fil employant, comme nous l'avons dit, un certain temps à se charger, les trois galvanomètres doivent dévier l'un après l'autre, car l'aiguille de chacun d'eux ne peut s'agiter que si, dans la portion correspondante du fil, la tension a atteint un degré suffisant pour produire cet effet dynamique. Quand les tuyaux de conduite présentent de nombreux renflements, l'eau remplit d'abord ces cavités avant de parvenir à l'extrémité, et son mouvement éprouve un retard, circonstance déjà signalée plus haut. De même, dans un câble submergé, l'électricité ne passe au delà d'un point donné qu'après la charge du condensateur formé par l'eau et par la partie du câble qui précède ce point. Semblablement, le mouvement électrique est retardé dans un fil notablement résistant. Hipp a trouvé que la transmission s'effectuait dans de gros fils plus rapidement que dans des fils fins deux cents fois plus courts, bien que la résistance absolue fût la même dans les deux conducteurs [1].

Le second cas de l'écoulement des fluides que nous avons exposé ci-dessus représente de quelle manière un

[1] Voy. B. U., *Archives des sciences naturelles*, 1859, vol. IV, p. 350.

fil préalablement chargé dans sa longueur revient à l'état naturel au moment où l'on met son extrémité en communication, soit avec le pôle négatif de la pile, soit avec le sol. En effet, c'est le galvanomètre le plus éloigné du pôle positif de la pile qui indique le premier une déviation, et plus tardivement l'aiguille du rhéomètre voisin de ce pôle entre en mouvement.

Enfin, dans le troisième cas, les choses se passent de même que lorsqu'un câble, chargé et isolé, communique par ses deux extrémités avec le sol : les rhéomètres extrêmes, au moment du contact, sont aussitôt déviés, chacun d'eux indiquant un courant de sens différent. A ce propos L. Clark fait remarquer qu'une onde électrique ayant commencé à parcourir un fil, peut revenir sur elle-même, si bien qu'il est possible, jusqu'à un certain point, de faire revenir au poste de départ la dépêche télégraphique que l'on vient de lancer dans un fil.

Le temps employé par les fils aériens pour arriver à l'état permanent, quoique très-court, est néanmoins parfaitement mesurable; Guillemin[1] l'a trouvé de $0^s,024$ en opérant sur un fil télégraphique aérien long de 500 kilomètres. Cet observateur plaça dans le circuit à l'extrémité voisine de la pile un interrupteur dont la pièce principale était une lame triangulaire fixée sur un cylindre tournant. Un ressort pouvait presser la surface du triangle en un point plus ou moins rapproché du sommet, et il donnait la mesure du temps pendant lequel le circuit demeurait fermé, car la vitesse de rotation du cylindre était connue exactement. Il trouva ainsi que si la durée du contact augmentait graduellement, le galvanomètre mis en communication avec l'extrémité éloignée du fil indiquait une déviation croissante jusqu'à ce que la durée du passage eût atteint une valeur maximum qui, dans le cas considéré, était de $0^s,024$,

[1] *Comptes rendus*, t. L, p. 184.

alors la déviation restait constante. Les résultats obtenus par Guillemin sont applicables seulement à la ligne qui a servi aux expériences; évidemment avec un autre fil, isolé d'une façon différente, les valeurs ne seraient plus les mêmes. Lorsque le rhéomètre est interposé dans la partie du circuit voisine de l'interrupteur, on constate d'abord un courant énergique, puis l'intensité décroît, et, quand la durée de la fermeture du circuit acquiert cette même valeur, $0^s,024$, le courant devient constant.

Nous voyons par là que l'électricité en se précipitant dans un conducteur vide, y pénètre avec une très-grande vitesse initiale, puis le mouvement se ralentit à mesure que la charge augmente.

Ces phénomènes parlent d'eux-mêmes et établissent manifestement les analogies du mouvement électrique avec celui des fluides. Nous ne disons pas qu'il est impossible d'expliquer tous ces faits par l'assimilation du courant électrique aux mouvements vibratoires, car ces démonstrations ne sont pas d'une telle rigueur et l'intelligence humaine n'a pas une pénétration à ce point si puissante qu'il nous soit permis de déclarer une chose impossible. Nous voulons dire simplement que l'explication des phénomènes cités précédemment nous semble inabordable, quand on ne suppose pas l'existence d'une translation continue ou tout au moins d'une suite de pulsations avec un véritable transport de fluide; et nous ne concevons pas quelle idée on peut s'en faire en regardant le courant comme un simple mouvement vibratoire. Quelques-uns admettent une espèce de radiation le long du conducteur suivie d'une absorption analogue à celle produite par les milieux colorés ou par les corps thermochroïques; ils comparent encore la transmission de l'électricité dans un fil à la propagation de la chaleur dans une barre; mais alors les phénomènes dont nous avons parlé devraient présenter un tout autre caractère. Cette ma-

nière de voir ne nous apprend pas pourquoi la rapidité avec laquelle le mouvement électrique envahit un conducteur dépend de l'intensité de la vibration qui lui a donné naissance et de la grosseur du fil qui lui livre passage; bien plus, les faits en question sont contraires à une telle hypothèse; l'intensité de l'impulsion et la section du conducteur n'exerçant aucune influence sur la vitesse de transmission d'un mouvement vibratoire. En outre, la théorie que nous discutons exige l'introduction d'une foule d'hypothèses toutes gratuites afin d'expliquer comment, dans des conditions déterminées, le mouvement électrique revient sur lui-même le long d'un fil, et comment on peut, à l'exemple de Latimer Cark, reprendre dans un fil télégraphique une partie de la dépêche qui vient d'y être envoyée, résultat facile à obtenir en rompant le circuit avant l'arrivée de l'onde électrique à l'extrémité de la ligne. Enfin, comme dernier argument, la loi de Ohm, relative à la tension ou aux forces électromotrices, n'est-elle pas identique à celle que l'on observe en expérimentant sur les fluides coulant dans des tubes munis de piézomètres[1]. Donc le courant est bien un mouvement comparable à l'écoulement des fluides.

Dans notre argumentation, nos exemples ont été empruntés aux transmissions électriques dans des fils soumis à des inductions énergiques, dans les câbles télégraphiques par exemple; mais on les observe aussi, à la vérité avec une moindre intensité, en expérimentant sur les fils aériens; les recherches de Guillemin ne laissent aucun doute à ce sujet; aussi doit-on reconnaître que, dans les deux cas, le mode de transmission ne diffère pas quant au mécanisme.

Du reste, rien n'empêche d'admettre l'existence dans le fil de quelque réaction due à l'élasticité de l'éther, et il se peut parfaitement que la vitesse de translation propre à

[1] Voir page 427

l'onde électrique soit la même que celle du mouvement vibratoire. Quelques exemples rendront notre pensée plus claire. Considérons (fig. 34) à nouveau le récipient R, incessamment rempli d'eau, dont nous avons déjà parlé, et supposons-le mis en communication, non plus avec un canal à ciel ouvert, mais avec un tuyau de conduite AB

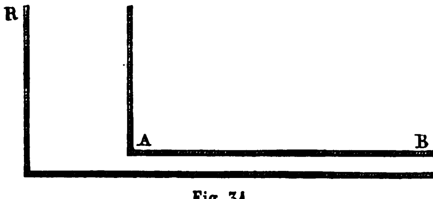


Fig. 34.

fermé à son extrémité libre B. Quand on abaisse la valve fermant cette extrémité, il se produit en ce point une variation de pression qui, en vertu de l'élasticité du liquide, se propage jusqu'au récipient avec une vitesse égale à celle du son dans l'eau, soit 1400 mètres par seconde. Or, cette pression est celle qui permet à l'eau de sortir incessamment par l'orifice du tube sans que ce tube soit jamais vidé; par conséquent, elle doit être transmise avec une vitesse supérieure à celle que prend le liquide en s'échappant par l'ouverture du conduit. Voici un autre exemple. Imaginons un long corridor, éclairé par deux fenêtres placées chacune à une de ses extrémités; l'une de ces fenêtres est fermée et pressée par le vent soufflant du dehors; l'autre est à demi-close. Lorsqu'on ouvre la première, aussitôt la seconde se ferme. C'est là un effet de la compression exercée sur l'air intérieur par le mouvement des battants : pression qui s'est propagée avec une vitesse égale à celle du son dans le gaz, et qui, par conséquent, a fait sentir son action sur toute la longueur du couloir, bien avant que cette même distance ait été franchie par le vent. On peut

expliquer par une action du même genre pourquoi une étincelle jaillit simultanément sur les deux extrémités d'un long fil approchées à une distance convenable des armures d'une bouteille de Leyde chargée, car alors c'est la tension seulement qui se transmet à travers la couche isolante, placée entre les armures avec une vitesse au moins égale à celle de la lumière, et aussitôt l'éther passe de ces armures dans le fil, ou du fil dans les armures, sans parcourir effectivement le fil conducteur dans toute son étendue. Lorsqu'on pratique vers le milieu du fil une solution de continuité, l'étincelle qui éclate en ce point retarde sur les étincelles extrêmes, parce qu'elle est produite par la décharge réelle en mouvement sur le conducteur. De cette manière, on rend compte des phénomènes de la bouteille de Leyde sans recourir à l'hypothèse des deux fluides. Toutes ces observations nous conduisent à dire que les fluides peuvent propager le mouvement de deux manières différentes : dans certains cas, la vitesse de transmission varie exclusivement comme l'élasticité du milieu; dans d'autres, elle est la résultante des pressions extérieures; et si la durée de l'état *initial* d'un canal dépend des conditions du conduit, cela tient à l'influence de ces pressions extérieures. Les choses se passant de la sorte dans les masses fluides, pourquoi n'en serait-il pas de même pour les mouvements électriques dont l'analogie avec les premiers est frappante? L'ensemble des faits connus nous conduit à croire que les physiciens versés dans l'étude de la télégraphie n'ont pas tort quand ils parlent de l'électricité comme d'un fluide en mouvement, et qu'ils appliquent au courant électrique, la terminologie de l'hydrodynamique[1].

Pour eux, non-seulement les fils conducteurs fonctionnent exactement comme de véritables tuyaux de conduite,

[1] V. L. Clark, *Rapport* cité, p. 294, n° 14.

mais encore la pile fait l'office d'un réservoir plus ou moins vaste et prompt à se remplir. En effet, plus la force électromotrice de la pile est intense, et plus promptes aussi sont les communications télégraphiques ; autrement dit, les conducteurs se remplissent alors très-rapidement, et ce résultat ne s'obtient pas en donnant à la pile seulement une tension énergique, il faut encore que, grâce à une puissante action chimique intérieure, la source électro-motrice produise une quantité abondante d'électricité dans un temps donné. C'est pourquoi la pile de Bunsen offre un avantage réel sur celle de Daniel, non-seulement sous le rapport de la tension, mais aussi de la quantité[1].

La théorie nous fournit encore plusieurs conséquences utiles au point de vue pratique.

1° Les dimensions du conducteur étant supposées constantes et la tension de la source invariable, la durée de la transmission varie en raison inverse de la conductibilité.

2° La conductibilité et les sections du fil ne changeant pas, cette même durée est directement proportionnelle au carré de la longueur du fil[2].

3° Toutes les autres conditions demeurant les mêmes, la durée de la transmission est en raison inverse de la section.

4° La durée de la transmission est indépendante de la tension de la source.

[1] Voici un fait très-propre à montrer que la force des piles n'est pas indéfinie. Quatre éléments d'une pile à sable, équivalant à un couple Bunsen, suffisent pour mettre en mouvement un moteur électro-magnétique de Froment. Mais, lorsque la pile à sable a travaillé pendant quelques heures, elle s'affaiblit beaucoup et a besoin de repos. Après une heure d'inactivité, elle reprend son énergie première pour s'affaiblir de nouveau un peu plus tard, et ainsi de suite; ces piles, à action intermittente, peuvent fonctionner de la sorte pendant une année entière.

[2] Nous trouvons ici une des raisons à cause desquelles les observateurs qui se sont occupés de la vitesse de l'électricité ont trouvé des valeurs différentes. Les résultats ne pouvaient concorder, puisqu'ils employaient des fils d'inégale longueur.

La deuxième loi a été trouvée généralement exacte, et si elle ne se vérifie pas rigoureusement dans les recherches de Guillemin citées plus haut, cette exception doit être attribuée à l'isolation imparfaite des fils [1]. Cette loi montre encore que le courant fait un travail en se propageant dans le fil.

Des expériences faites par Latimer Clark et par Hugues sur les lignes télégraphiques ont établi l'exactitude de la dernière loi. Avec une pile de 10 éléments et une autre de 500 éléments, la vitesse de transmission était la même, seulement la largeur et l'intensité des traits de la dépêche étaient différentes. Les fils revêtus de substances isolantes, et soumis, par suite, à des effets d'induction, se comportent comme de très-larges conducteurs; mais les lois restent les mêmes.

Certaines personnes ont cru pouvoir assigner au courant comme cause efficiente un mouvement de vibration, car les formules établies dans cette hypothèse concordent avec les résultats fournis par l'observation. Mais nous l'avons déjà dit, toutes les formules des mathématiciens, alors même que leurs moindres conséquences sont confirmées par les expériences des physiciens, ne nous apprennent rien sur la nature du courant électrique, et ne peuvent nous faire reconnaître si le courant est un mouvement de translation ou une vibration. Déjà Fourier, après ses beaux travaux analytiques sur la chaleur, se trouva dans l'impossibilité de décider si le calorique était une substance ou un mouvement. Quant aux lois de Ohm, elles sont relatives aux tensions et se rapportent spécialement à l'état variable, sans fournir aucune donnée positive sur l'état définitif du courant. Gaugain ayant prouvé expérimentalement qu'elles sont aussi vraies pour les corps isolants, on a en conclu qu'elles s'appliquent aux bons con

[2] Voy. Gaugain, *Annales télégraphiques*, vol. III, p. 147, et vol. IV, p. 117 et 123.

ducteurs, parce que, au point de vue de l'électricité, aucune différence bien tranchée ne sépare ces deux classes de corps.

Dans les substances isolantes, la communication directe n'existe réellement pas; il se développe seulement une certaine disposition moléculaire nommé induction, et dont il nous faudra faire une étude particulière. Mais auparavant poursuivons l'examen des autres phénomènes dus au courant, car ils nous feront mieux comprendre les propriétés spéciales au corps mauvais conducteurs.

CHAPITRE XIII

DES COURANTS INDUITS

La découverte des courants induits est une des plus belles et des plus fécondes de celles qui ont illustré le nom de Faraday. Cette découverte, dans son histoire, a quelque analogie avec celle d'Orsted. En effet, c'est en cherchant si l'électricité statique agissait sur l'aiguille aimantée, que le savant danois reconnut les attractions électro-dynamiques, et de son côté Faraday trouva l'induction voltaïque instantanée pendant qu'il cherchait l'induction permanente.

Les lois fondamentales de l'induction sont :

1° Toutes les fois que l'on approche d'un circuit fermé un conducteur traversé par un courant, il se produit aussitôt dans ce circuit un courant nommé courant induit, de sens contraire au courant inducteur qui parcourt le fil rhéophore; le courant induit n'a qu'une durée très-courte. Quand on éloigne le courant inducteur, il se manifeste dans le circuit fermé un nouveau courant instantané, mais cette fois de même sens que le courant inducteur.

Au lieu d'approcher et d'éloigner l'un des deux circuits on peut les laisser appliqués l'un sur l'autre et lancer subitement le courant dans l'un ou le supprimer. Les résultats sont les mêmes : il se manifeste un courant induit inverse, c'est-dire de sens contraire au courant inducteur, au moment de la clôture du courant de la pile, et un courant induit direct, c'est-à-dire de même sens que le courant inducteur, au moment où on supprime ce dernier.

En opérant de cette manière, les choses se passent comme si le courant inducteur était éloigné ou rapproché d'une quantité infinie.

A ces lois relatives aux signes des courants induits se joignent les suivantes touchant leur intensité.

2° Le courant induit inverse et le courant direct sont égaux sous le rapport de la quantité électrique, mais leur durée et leur tension sont différentes : le courant direct est le plus intense. Cependant tous deux impriment à l'aiguille d'un galvanomètre ordinaire une égale déviation; car l'amplitude de la déviation dépend du temps qu'emploie l'aiguille à se mettre en mouvement, et il arrive qu'une moindre force d'impulsion est compensée par une durée plus grande. Mais en faisant usage de galvanomètres délicats et de l'appareil nommé pont électrique[1], les déviations produites par les deux courants in-

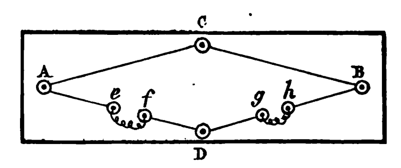


Fig. 35.

[1] Le pont électrique a été imaginé par Wheatstone pour comparer les résistances de deux conducteurs de l'électricité dans le cas où la différence est trop faible pour être appréciée à l'aide du rhéostat.

duits sont différentes. Hipp a trouvé que la force du courant de fermeture du circuit était à celle d'ouverture comme 1 : 6, et les durées de ces deux courants évaluées en unités de temps étaient respectivement $0^s,0114$ et $0^s,0042$. En outre, la tension du courant d'ouverture est la plus grande, puisque, lancé dans le fil télégraphique, il transmet une dépêche à une distance de 250 lieues, tandis que l'autre courant franchit seulement une longueur de 20 lieues[1].

L'inégale intensité des deux courants induits nous explique pourquoi, lorsqu'une aiguille d'acier est aimantée par le courant induit la distribution de ses pôles est celle qui convient au courant de clôture.

De même dans la machine de Rumkorff, des deux sortes de courants induits ceux qui se forment quand le circuit induit est interrompu sont les plus forts et sont les seuls qui peuvent passer.

Il se compose (fig. 35) d'une planchette sur laquelle est fixé un fil contourné en losange ACBD, et présentant en *ef* et en *gh* une interruption. Aux sommets du losange et aux extrémités *e*, *f*, *g*, *h*, se trouvent des vis de pression. Les vis A, B sont destinées à recevoir les rhéophores d'une pile, les deux autres C, D à saisir les extrémités du fil d'un galvanomètre. Par cette disposition, supposant les communications établies en *ef* et *gh*, de chaque pôle de la pile partent deux fils qui se rendent, le premier à une extrémité du fil du galvanomètre, le second à l'autre extrémité. Si les quatre fils sont de longueur et d'épaisseur égales et de la même substance, il s'établit un équilibre parfait, de sorte qu'une source électrique, quelque puissante qu'elle soit, ne produit pas la moindre variation sur l'aiguille d'un galvanomètre. Mais quand, à l'aide des deux vis de pression *e* et *f*, on intercale dans le trajet du courant ACDB la résistance qu'on se propose de mesurer, et que, sur le trajet ADCB, on place en *gh* la résistance unité, l'équilibre du galvanomètre est troublé, et, suivant le sens du courant qui est prépondérant, on reconnaît si la résistance *ef* l'emporte sur celle en *gh* ou lui est inférieure. Par suite, on peut établir l'égalité entre ces deux résistances et en conclure la mesure de celle introduite en *ef*. (Voy. *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. X, p. 265.)

(*Note du traducteur.*)

[1] Bibl. univ., *Arch. des sciences naturelles*, 1859, vol. IV, p. 350.

3° L'action inductrice entre deux éléments varie en raison inverse de la simple distance, dans le cas où les conducteurs sont séparés par un milieu isolant; mais si ce milieu est conducteur, l'intensité de l'induction s'affaiblit rapidement à cause des phénomènes d'influence qui se développent dans la masse interposée. Or, comme il n'y a pas de corps qui conduisent parfaitement ou qui isolent parfaitement, l'effet produit dépend beaucoup plus de la nature et de l'épaisseur du milieu que de la distance qui sépare les conducteurs.

4° Lorsqu'on soumet à l'induction une hélice à spires nombreuses, chacune des circonvolutions contribue par son courant élémentaire à la somme des impulsions finales qui compose le courant induit, et l'intensité est proportionnelle au nombre des tours. La raison de ce fait est évidente; il résulte de ce que chaque tour suivant doit se charger d'électricité au dépens du tour précédent.

De cette manière on arrive à rendre l'induction assez puissante pour obtenir, non-seulement un courant mais une tension électrique très-forte. Il suffit pour cela d'employer des machines d'induction à long fil, telles qu'on les construit maintenant; ces appareils peuvent remplacer les anciennes machines électriques à plateau et transforment réellement l'électricité dynamique en électricité statique.

5° De même que le courant volta-électrique, les courants induits peuvent, par leur influence sur des circuits fermés, donner naissance à de nouveaux courants induits puis ceux-ci à d'autres, et ainsi de suite, de manière à produire des courants induits de divers ordres. Or, chacun de ces courants produisant deux courants au moment où il commence et à l'instant où il finit, les phénomènes se compliquent et les courants s'affaiblissent à mesure qu'ils sont d'un ordre plus élevé.

6° Lorsqu'on ouvre un circuit parcouru par un courant,

il se produit un courant induit au sein du rhéophore lui-même ; si ce courant est dirigé dans un conducteur ou dans un fil latéral il reçoit le nom extra-courant. L'extra-courant possède une tension de beaucoup supérieure à celle de la pile, ce qui nous explique pourquoi on obtient une très-brillante étincelle et une violente secousse en rompant le circuit d'une pile dont les pôles sont réunis par un fil d'une grande longueur. A longueur égale, le fil étant contourné en hélice, les effets sont plus marqués que si on le laisse rectiligne, et un tel résultat s'explique aisément à l'aide de la quatrième loi.

7° Les aimants, eux aussi, sont capables d'induire les circuits fermés ; ils se comportent en tout point comme les systèmes de courants, nommés solénoïdes par Ampère. Bien plus, les courants magnétiques des forts aimants étant très-énergiques, ils développent des effets intenses, si bien que, au point de vue pratique, il y a avantage à remplacer l'induction volta-électrique par celle magnéto-électrique ou tout au moins à combiner l'influence inductrice d'un aimant ou d'un électro-aimant avec celle d'un courant voltaïque. En approchant et éloignant tour à tour un aimant énergique d'un circuit métallique fermé, ou encore en aimantant et désaimantant successivement un noyau de fer placé au centre d'une hélice conductrice et d'une manière générale en troublant par un procédé quelconque l'état magnétique de substances aimantées il est facile d'obtenir des courants assez énergiques pour donner des manifestations calorifiques et lumineuses dont les lois sont les mêmes que celles des effets analogues produits par les courants voltaïques.

Enfin la terre agissant comme un véritable aimant, donne aussi naissance à des courants d'induction et lorsqu'on recourt à des dispositions convenables ils acquièrent une intensité telle qu'ils produisent des étincelles et des décompositions chimiques. Par conséquent une quantité con-

sidérable d'électricité se développe au sein de toutes les grandes masses métalliques animées de mouvement, et si ce n'était la facilité avec laquelle cette électricité est ramenée à l'état neutre, nous serions incessamment exposés à être foudroyés (Faraday).

8° Arago a découvert que les corps conducteurs en mouvement tendent à entraîner les aimants placés à une petite distance de leur surface ; les phénomènes de ce genre, connus sous le nom de magnétisme de rotation, sont causés par des courants induits, développés dans les corps conducteurs des courants, dont on a pu constater l'existence à l'aide de procédés rhéométriques.

Tels sont les faits principaux qui constituent toute une vaste branche des sciences physiques; il nous reste maintenant à chercher comment, au point de vue mécanique, nous pouvons expliquer ces phénomènes. Et pour arriver à ce résultat, il ne faut pas s'astreindre à étudier les phénomènes dans l'ordre qui vient d'être indiqué ; mais il convient de procéder suivant l'ordre le plus favorable à notre sujet.

Ces phénomènes sont analogues aux résultats obtenus dans une série d'expériences d'hydraulique sur lesquels nous nous arrêterons un instant.

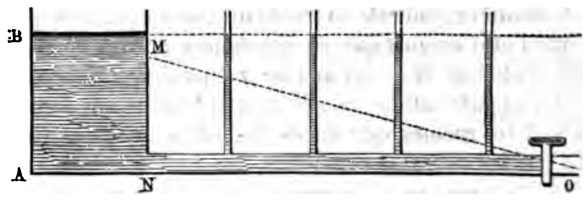


Fig. 36.

Soit (fig. 36) un récipient, AB, rempli d'eau et à niveau maintenu constant; mis en communication avec un tuyau horizontal, N O, muni d'un robinet en O et sur la longueur

duquel sont adaptés plusieurs petits tubes verticaux en verre, appelés piézomètres.

Lorsque l'orifice O est fermé à l'intérieur des piézomètres, l'eau se tient à la même hauteur que dans le réservoir; vient-on à ouvrir le robinet O, on voit : 1° dans tous les piézomètres se manifester très-rapidement un abaissement du niveau lequel descend de beaucoup au-dessous de celui qu'il occupe pendant l'écoulement continu du liquide.

2° Le courant étant établi d'une manière permanente, les surfaces liquides libres dans les divers piézomètres sont situées sur une ligne droite, M O, inclinée par rapport à l'horizon.

3° Au moment où l'on ferme l'orifice O, dans tous les tubes indicateurs, le niveau du liquide s'élève subitement à une hauteur notablement supérieure à l'horizontale K l qui correspondait à l'état d'équilibre de la masse fluide; puis après une série d'oscillations il revient occuper sa position primitive sur cette horizontale.

Le premier fait est momentané et constitue, pour ainsi dire, un coup de bélier négatif, rappellant assez bien le courant d'induction de fermeture du circuit électrique. La disposition uniforme des niveaux dans la seconde partie de l'expérience a pour homologue la loi de Ohm appliquée au cas d'un conducteur indéfini se déchargeant dans le sol par une de ses extrémités, tandis qu'à l'autre il est en communication permanente avec une pile. Enfin la dernière phase de l'expérience est exactement comparable au contre-coup qui produit le courant induit d'ouverture[1].

Ces changements soudains d'équilibre dans les pressions peuvent être observés d'une manière encore plus saisissante.

Supposons un récipient MN, portant adapté à son fond

[1] Il faut faire attention que la fermeture du tube équivaut à ce que l'on nomme en électricité ouverture du circuit électrique.

un tube de caoutchouc KO, parfaitement cylindrique ; lorsqu'on laisse le liquide s'écouler par ce conduit, il change de forme et sa section, de circulaire qu'elle était primitivement, s'allonge et prend la figure d'une boutonnière, à peu près comme il est représenté en R (fig. 37). La section devient alors notablement plus petite, particularité que l'on peut mettre en évidence à l'aide du dispositif suivant : On enferme le tube KO dans un cylindre de métal AB, dont il occupe l'axe, ce cylindre porte vers sa partie supérieure d'un ajutage recourbé C plongeant dans l'eau d'une capsule D, le tube métallique AB est rempli d'eau.

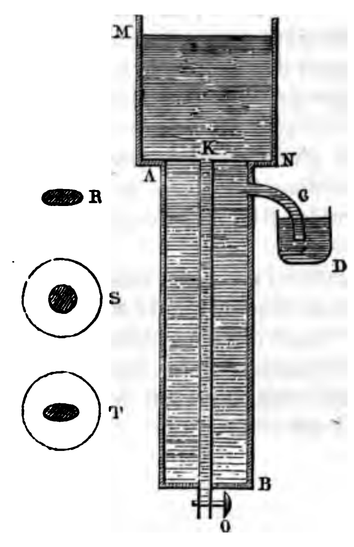


Fig. 37.

Au moment où on ouvre le robinet O, une partie de l'eau contenue en D passe brusquement dans l'ajutage C. Au contraire, lorsqu'on ferme l'orifice O, il se produit un refoulement par le tube C et la quantité d'eau du vase D augmente. Ces résultats sont évidemment dus à la diminution de pression qui a lieu au moment de l'écoulement dans tout conduit traversé par un fluide. La cavité du tube extérieur AB, qui d'abord était annulaire comme elle est figurée en S, se transforme en une autre T dont l'aire est plus grande, puisque la section du tube flexible a diminué d'étendue.

Appliquons ces données au cas de l'électricité.

Que le courant électrique soit un flux d'éther ou de toute autre matière, il est manifeste qu'au moment où un courant envahit un conducteur, le milieu ambiant éprouve une modification dans son état de pression, lequel provoque un mouvement d'éther jusqu'à ce qu'un nouveau régime soit rétabli, ce qui arrive après un temps très-court. L'équilibre ainsi constitué persiste autant que le courant. Au moment où ce dernier cesse, il y a une sorte de reflux, afin que le milieu revienne à sa première condition.

Notre théorie est générale et se prête facilement à de nombreuses déductions, aussi allons-nous l'appliquer aux divers cas particuliers de l'induction.

Le courant induit, avons-nous dit, apparaît seulement à l'instant de la clôture ou de la rupture du courant inducteur, tandis que toute manifestation cesse dans le fil induit pendant que le circuit inducteur reste fermé. Un tel phénomène nous prouve que, dans les corps disposés autour d'un fil traversé par le courant, l'éther est dans un état d'équilibre différent de celui qui lui appartenait avant la mise en circulation du flux électrique. Ce changement d'équilibre devient manifeste à l'instant où se constitue un nouvel état de choses, et il ne peut durer pendant tout le passage du flux électrique, parce qu'un équilibre nouveau s'établit promptement au sein des corps isolants qui séparent les conducteurs et réagit sur ces derniers. Tant que dure la circonstance modificatrice, il ne se manifeste rien, mais lorsqu'on rompt le circuit, l'état des choses redevient ce qu'il était primitivement, et l'équilibre de l'éther encore une fois est troublé.

Cette rupture d'équilibre de l'éther produite par l'influence des courants, est analogue à celle que nous observons dans certaines expériences faites avec l'électricité de tension. Si, par exemple, un galvanomètre sensible com-

munique avec une sphère métallique isolée, chaque fois que l'on approchera de cette sphère un conducteur chargé d'électricité, le rhéomètre accusera le développement d'un courant de la sphère vers le sol, et si on décharge le conducteur l'aiguille indiquera un courant du sol vers le fil. Ces observations nous préparent à comprendre en quoi consiste l'état électrique des corps qui a été nommé état de tension et à reconnaître la relation qui existe entre les effets de tension et ceux dus au courant. Ainsi l'induction doit être regardée comme le trait d'union qui relie les phénomènes d'électricité statique à ceux de l'électrodynamie.

En cherchant à expliquer les faits précédents, nous trouverons des données utiles pour éclairer le difficile problème des actions à distance, car l'induction électrique est, à vraiment parler, un exemple d'action à distance puisqu'elle s'exerce à travers le vide et les corps mauvais conducteurs et qu'elle présente toutes les particularités des forces dites actions à distance. Mais avant d'entrer plus avant dans la théorie de l'induction, il est bon de faire remarquer que les phénomènes d'influence, dont nous avons rappelé les lois, présentent une grande complexité et ne sont pas tous de la même espèce.

Les phénomènes d'induction se partagent tout naturellement en deux classes : les uns se produisent au sein du conducteur traversé par le courant inducteur, et les autres se manifestent entre circuits plus ou moins rapprochés. Dans le premier cas on dit qu'il y a induction d'un courant sur lui-même. Le mot induction intérieure, à notre avis, serait meilleur. Nous commencerons l'analyse de la question par l'étude de cette induction intérieure, car c'est elle qui nous fera comprendre comment les choses se passent dans les cas d'induction extérieure.

Nous avons déjà mentionné qu'à l'instant où on interrompt brusquement le courant dans un rhéophore, on

observe un renforcement de courant qui se traduit par une forte tension. (Voy. plus haut 6°.) Ce phénomène est en tout comparable à celui que nous avons vu plus haut se développer dans un tube parcouru par un courant d'eau lorsqu'on vient à fermer brusquement l'orifice de sortie. A ce moment se produit ce que l'on a nommé un coup de bélier, c'est-à-dire un choc contre les parois latérales et contre la clef du robinet servant à interrompre le cours du fluide. Cette force vive peut même être utilisée. En effet si, adoptant une disposition signalée dans une expérience précédente, le tuyau de conduite communique avec un tube latéral, aussitôt que l'on arrête l'écoulement dans le tube principal l'eau jaillit dans la branche latérale à une hauteur assez grande et sensiblement proportionnelle à la vitesse du courant. C'est là le principe du bélier hydraulique de Montgolfier. Le phénomène que nous examinons, est dû à l'inertie et à la vitesse de la masse mise en mouvement dans le tube ; autrement dit, c'est la force vive emmagasinée dans cette masse qui en entraîne une portion au-dessus du niveau du réservoir. Le coup de bélier s'observe également lorsqu'on interrompt un courant gazeux et il doit être compté parmi les faits fondamentaux de l'hydrodynamique[1]. Par consé-

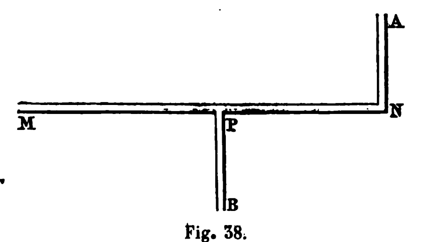


Fig. 38.

[1] Les gaz permettent de faire une jolie expérience sur le sujet qui nous occupe ici. Un courant de gaz d'éclairage est introduit dans un tube en caoutchouc MN, muni de deux tubes latéraux PB et NA, terminés par des becs, à l'extrémité desquels on peut allumer le jet

L'ouvrage de Venturi renferme des exemples nombreux de communication du mouvement latéral des fluides. Il cite les remous des fleuves, l'aspiration des tourbillons au voisinage des orifices, la transmission du mouvement vibratoire dans les tuyaux d'orgue, etc., faits que pour la plupart la théorie hydrodynamique généralement acceptée encore aujourd'hui n'explique pas, et nous ne devons pas en être surpris, car les équations du mouvement des fluides sur laquelle elle repose, ont été fondées sur le principe de l'égalité de pression dans tous les sens, lequel malheureusement ne s'applique pas aux cas des fluides qui de l'équilibre passent au mouvement. A la vérité, Poisson a essayé d'établir ces équations en suivant une méthode plus générale, mais il a rencontré des difficultés d'analyse telles que ses formules sont loin de convenir à tous les cas[1]. Lui-même, dans son traité de mécanique, donne les équations du mouvement des fluides en les déduisant du principe hydrostatique de l'égalité des pressions, étendu au cas des fluides en mouvement; mais il avoue l'insuffisance de ce principe et reconnaît que plusieurs phénomènes des fluides animés de mouvements doivent s'expliquer par une inégalité de pression dans les divers sens[2]. Ainsi le calcul laisse trop à désirer sur la question présente pour que nous espérions en tirer une explication analytique des courants d'électricité. Nous sommes réduits à traiter le problème *a posteriori* et à baser nos raisonnements sur des analogies, méthode qui certainement ne satisfera pas tous les esprits.

Cette manière de procéder une fois acceptée, il nous semble très-rationnel de rapporter les phénomènes de l'induction à un affaiblissement des pressions latérales, lequel existe certainement si le courant est un flux de fluide éthéré; or, d'après l'ensemble des faits exposés ci-

[1] Poisson, *Journal de l'Ecole polytechnique*, cah. XX, t. II.
[2] Poisson, *Mécanique*, t. II, p. 665. Paris, 1833.

dessus, ce point nous paraît acquis à la science. La seule difficulté qu'aucune expérience décisive n'a tranchée jusqu'ici est de savoir si le courant est uniquement un flux d'éther ou bien s'il y a en même temps transport des molécules matérielles; mais peut-être sera-t-elle résolue par l'examen critique auquel nous allons soumettre les phénomènes d'induction. Notre tentative est au moins bonne en cela, qu'établissant un lien entre l'induction et les autres branches de la physique, elle fait cesser l'état d'isolement dans lequel se trouve un chapitre important de l'électricité.

Les corps voisins du fil traversé par le courant sont ou conducteurs ou isolants; dans ces deux cas, les effets diffèrent. Examinons d'abord le cas d'une substance isolante. Les notions acquises sur la manière d'agir de l'électricité nous prouvent que dans les mauvais conducteurs les mouvements de transport du flux électrique sont seulement possibles dans des limites très-étroites, que d'autre part ce flux rencontre les plus grandes difficultés à passer d'un isolant à un conducteur; pour lui faire surmonter cette résistance, il est besoin d'une influence extérieure qui exagère sa tension. Si donc un fil est parcouru par un courant, la pression diminue au sein du rhéophore; par suite, tout autour, une aspiration tend à se faire, en vertu de laquelle, dans les couches successives du milieu isolant circonvoisin, s'établit un afflux vers le fil, et, par conséquent, les couches les plus éloignées éprouvent une dilatation.

Soit AB (fig. 39) le fil inducteur, et MN le fil induit, avant l'admission du courant dans AB, l'éther compris entre les deux conducteurs est distribué d'une manière uniforme, et nous pouvons représenter cet état par une suite de parallèles équidistantes. Mais lorsque le courant est établi dans A′B′, la distribution de l'éther change; le fluide est condensé dans les couches voisines de A′B′ (fig. 40), et dilaté dans celles qui touchent à MN; par conséquent,

conducteur M N subira un effet d'aspiration de la part de la couche d'éther directement en contact avec lui; et, si

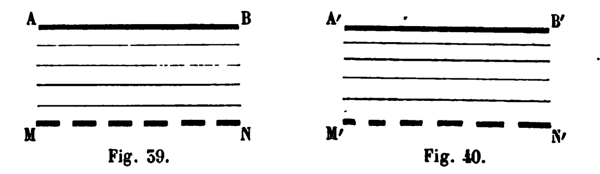


Fig. 39. Fig. 40.

nous faisons abstraction du milieu interposé, nous pourrons envisager l'influence de A B sur M N comme une action immédiate.

Les personnes qui accepteraient difficilement ces effets de condensation et de dilatation de l'éther, peuvent supposer que, la pression diminuant, les molécules sont susceptibles d'oscillations plus énergiques, et ainsi se trouve accrue leur action sur le milieu ambiant; dans l'une ou l'autre hypothèse, le résultat final demeure le même.

Avant d'examiner les phénomènes d'induction dans les fils conducteurs, il est nécessaire de rappeler ce qui a été dit relativement au mode de propagation du courant dans ces fils. L'établissement du courant n'y est pas instantané. Pour envahir un fil, le flux électrique emploie un temps déterminé, et il se transmet successivement d'une section à la suivante, si bien que l'état définitif est précédé d'un état variable ayant une durée plus ou moins longue, que l'on a trouvée en rapport avec l'intensité de l'induction dont les corps environnants sont susceptibles. Cela s'explique aisément : l'induction est un véritable travail et la force du courant n'est pas indéfinie; donc l'effet se produit en un temps plus ou moins long, selon la masse mise en mouvement autour du conducteur.

La durée de l'établissement d'un flux élecrique dans un fil, quoique fort petite, peut toujours par la pensée

être divisée en intervalles moindres, pendant chacun desquels le front de l'onde électrique envahit une des tranches successives du fil conducteur, exerce en même temps son action sur le milieu ambiant et, par l'intermédiaire de celui-ci, sur un circuit placé à une certaine distance. Voyons donc comment une diminution de pression dans l'éther, qui enveloppe un circuit inducteur, peut développer un courant induit. Soit d'abord un cas simple et assez général pour résumer les autres; par exemple, celui de deux fils parallèles, dont l'un reçoit le courant inducteur, tandis que dans l'autre se développe le courant induit.

Soit AB (fig. 41) le fil inducteur, et MN le fil induit sé-

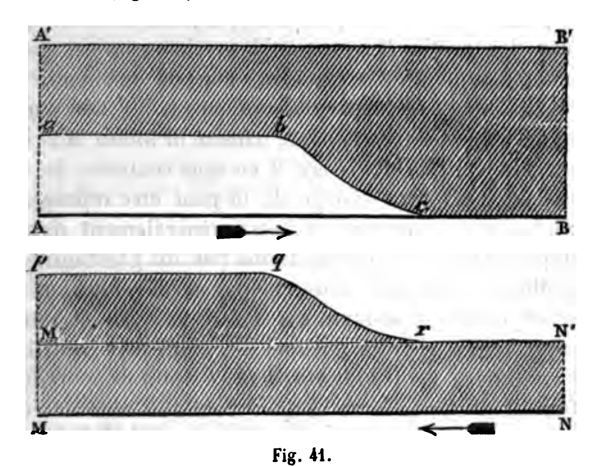


Fig. 41.

paré du premier par une couche mince d'une substance inapte à livrer passage à l'électricité, mais dont le régime éthéré se modifie sous l'influence d'une variation de tension électrique. On peut représenter, par les ordonnées d'une ligne droite A'B', la tension naturelle du fil AB, et

par celles d'une autre droite M'N', parallèle à MN, la quantité naturelle de l'éther à l'intérieur du fil MN avant l'introduction du courant dans AB. Aussitôt après la clôture du circuit AB, la pression diminue dans ce fil, et cette diminution peut être figurée par la courbe *abc*, représentant le vide produit. La conservation de l'équilibre exige qu'aussitôt la pression affaiblie autour du conducteur il se fasse un appel d'électricité de l'espace environnant vers le fil.

A ce même moment dans le circuit MN le tronçon M'*r*, recevant par l'intermédiaire du milieu ambiant l'influence de la diminution de pression survenue dans AB des parties éloignées l'éther se précipite du côté du vide pour établir la compensation; et, comme il ne peut affluer des parties M'*r* sans qu'il survienne en ces points un affaiblissement de la pression, afin de maintenir l'équilibre, l'éther doit arriver de la partie N'*r* non encore envahie par le courant. Donc, dans le fil induit MN, il se produit un courant de N vers M en sens contraire du courant inducteur, et la charge du fil peut être représentée par *pqr*. Si, comme cela se passe généralement dans la pratique, MN est un circuit fermé par un galvanomètre, l'aiguille de l'appareil indique, par sa déviation, que le courant marche constamment de N vers M, et jamais en sens inverse, car la portion M*r*, étant déjà équilibrée par l'influence du tronc précédent, ne saurait contribuer à fournir du fluide à la section contiguë sans détruire son propre équilibre. La quantité absolue d'éther qui existe dans le fil pendant le passage du courant doit subir une augmentation, mais sa tension ne sera pas sensible, parce qu'en réalité il ne fait que rétablir l'équilibre troublé par la diminution de pression survenue en AB, et lorsque MN est amené à une charge suffisante pour l'équilibre, le mouvement électrique s'arrête dans le fil.

Donc, aussitôt après la cessation de l'état initial du courant dans AB, le conducteur induit paraît revenir à l'état naturel, de telle sorte qu'il n'y a aucun courant permanent, mais la charge absolue a augmenté.

Examinons maintenant le cas de l'induction finissante, c'est-à-dire celle qui se manifeste à l'ouverture du circuit.

Les ordonnées (fig. 42) de la ligne A′B′ parallèle à AB

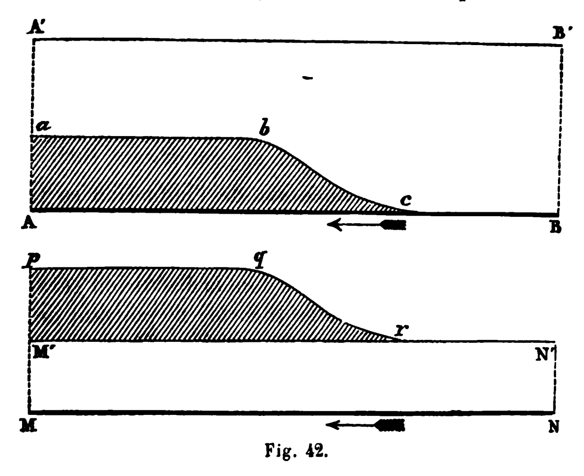


Fig. 42.

représentent comme ci-dessus la quantité naturelle de l'éther dans le fil à la pression ordinaire, c'est-à-dire en l'absence de tout courant. Quelques instants après l'interruption d'un courant, la partie droite B*c* est revenue à l'état naturel, et *ab* ne l'est pas encore. L'espace A*abc* représente le vide fait dans la portion correspondante. Le front d'arrière de l'onde électrique marche suivant la flèche. Dans cet état de choses, il est évident que le conducteur induit sera ramené à sa pression naturelle NN′ dans la partie N′*r* et aura une charge M′*pqr* dans l'autre

partie M'*r*. Le front *pqr* du courant suivra la marche de *abc*, et dans le fil MN le courant sera de même sens que dans le courant inducteur, l'afflux électrique ayant toujours lieu du côté où la diminution de pression subsiste encore; donc il se fera un courant induit direct. Ce courant, de même que le premier, est très-court et on le nomme communément *instantané*, parce que dans une section donnée, l'équilibre se rétablit aussitôt par l'effet des autres parties du circuit. Si, lors de la rupture du courant inducteur, le circuit induit est ouvert, il se manifeste une accumulation sensible d'électricité dans le sens de l'onde inductrice, c'est-à-dire du côté de M, et par suite une tension vers cette extrémité, et une étincelle de décharge.

Les phénomènes fondamentaux de l'induction se trouvent ainsi expliqués, mais il est un grand nombre de faits secondaires qui découlent de notre principe fondamental comme autant de corollaires, et dont la discussion serait le complément naturel de notre théorie; ne pouvant entrer dans tous les détails, nous nous bornerons à indiquer les points principaux.

1° Rappelons ce qui a été dit plus haut, relativement à la différence de tension des deux courants induits de clôture et d'ouverture. On saisit maintenant pourquoi le courant d'ouverture est le plus intense ; en effet, à ce moment, la charge électrique du fil se porte tout entière et se concentre à une extrémité; de plus, elle est renforcée par *le coup de bélier* du courant principal, auquel il faut encore ajouter un effet du même genre dû au courant induit qui ne peut perdre instantanément la vitesse dont il est animé. Toutes ces causes contribuent beaucoup à la décharge avec étincelle.

2° On peut comparer les courants induits à de grandes vagues électriques accourant pour compenser la diminution de pression survenue dans les conducteurs voisins, et

aussitôt l'équilibre établi la pression redevient ce qu'elle était primitivement.

3° Quand on place une lame conductrice entre les deux spirales d'une bobine d'induction, les effets diminuent d'une manière notable, et la lame métallique fournit directement des courants induits; il résulte de là que l'influence inductrice s'exerce simultanément sur toute la masse ambiante, et que l'induction étant une action de transport et non de radiation, son intensité ne décroît pas avec le carré de la distance, mais diminue en raison de la masse qui, interposée entre les conducteurs, concourt à rétablir l'équilibre de pression. (Voy. n° 2, même chapitre.)

4° Dans une hélice, la disposition du fil est telle, que chaque spire emprunte pour ainsi dire le fluide à la suivante, et celle-ci aux autres; par conséquent, plus le nombre des tours sera grand, plus grande aussi sera la différence de pression de l'électricité mise en mouvement. Au contraire, dans un conducteur massif, l'afflux électrique se fait d'un seul coup. Il est donc facile de s'expliquer pourquoi la forme hélicoïde du circuit est la plus avantageuse à donner, non-seulement au fil induit, mais encore au fil inducteur, dont l'extracourant est ainsi notablement renforcé. La décharge d'une bobine formée par plusieurs couches ne peut être instantanée; elle est, au contraire, multiple, et les diverses couches réagissant les unes sur les autres, il se produit une sorte d'ondulation rhythmée. En effet, les expériences de Gassiot, sur les appareils d'induction, ont montré que, lors de l'ouverture ou de la fermeture instantanée du circuit, la lumière obtenue dans un milieu raréfié, est constamment stratifiée.

Enfin il n'est pas indifférent de donner telle ou telle longueur relative aux hélices induites et inductrices, aussi, dans les machines d'induction, les conditions expérimen-

tales sont-elles fort compliquées, d'autant plus qu'il faut tenir compte de l'influence due à l'état magnétique des pièces de l'appareil et à la charge statique qui se fait dans l'enveloppe isolante des fils, comme l'a constaté M. Rhumkorff. Dans les machines d'induction ordinaires, l'extracourant du coup du bélier est étouffé par un condensateur qui en absorbe la décharge, et on l'empêche ainsi de rebrousser chemin dans le fil inducteur et de paralyser l'influence déjà produite sur le fil induit. Au lieu d'étouffer l'extracourant à l'aide d'un condensateur faisant l'office d'un vaste réservoir, on arrive au même résultat en l'employant à produire un travail quelconque assez énergique pour en absorber toute la force vive. Mais nous ne devons pas, dans cet ouvrage, nous arrêter davantage sur toutes les questions secondaires; il nous suffit d'expliquer les phénomènes fondamentaux.

Les aimants ont été assimilés par Ampère à des solénoïdes et théoriquement ils peuvent être considérés comme des systèmes de courants, bien que l'on n'ait pas encore réussi à tirer directement un courant de la substance d'un aimant. Or les propriétés inductrices des aimants mettent hors de doute l'exactitude de la théorie d'Ampère et nous montrent que si un aimant employé seul ne nous donne pas un flux électrique, cela tient à l'impossibilité dans laquelle nous sommes d'ouvrir et de fermer ses circuits moléculaires, et de les mettre en rapport avec un galvanomètre. L'effet que l'aimant ne peut réaliser seul, il le produit d'une façon indirecte en troublant l'équilibre de l'éther des corps circonvoisins. Les propriétés caractéristiques de ce genre d'action seront signalées plus loin; qu'il suffise pour le moment de rappeler que l'induction magnéto-électrique nous donne le moyen de transformer la puissance magnétique en chaleur, par l'intermédiaire d'une action mécanique.

Arago à reconnu (n° 7 de ce chap.) que si une aiguille

aimantée oscille au-dessus d'une plaque de cuivre, l'amplitude des oscillations diminue avec rapidité et l'aiguille s'arrête promptement ; il découvrit, en outre, que réciproquement un disque de cuivre M (fig. 43), mis en rotation à l'aide d'une corde sans fin A B au-dessous d'une aiguille aimantée *a b*, l'entraîne dans le sens de son mouvement.



Fig. 43.

Ces effets sont dus à des courants induits développés dans l'intérieur de la lame métallique. Or, à l'exemple de Joule, de Foucault, on peut renverser l'expérience et faire tourner un disque de cuivre entre les pôles d'un aimant puissant, ou d'un fort électro-aimant. Alors il se développe des courants induits au sein de la masse métallique, et ceux-ci réagissant sur les molécules matérielles, les mettent en vibration, d'où l'élévation de température très-notable du métal durant cette expérience déjà citée dans un des premiers chapitres de cet ouvrage. Le dégagement de chaleur a lieu aux dépens de la force mécanique employée à mettre le disque en rotation. En effet, quand l'électro-aimant de l'appareil de Foucault (voy. fig. 8, p. 18) n'est pas traversé par un courant, la force

nécessaire pour faire tourner la lame de cuivre est très-faible ; mais vient-on à lancer dans le fil de l'électro-aimant le courant d'une pile de six couples, un seul homme, agissant sur la manivelle de l'instrument, ne parvient pas à déplacer un disque dont le diamètre a seulement quelques centimètres de longueur; ce disque semble immobilisé par un frein invisible, tant est grande la résistance au mouvement. Dans cette curieuse expérience, on voit le travail mécanique se transformer en chaleur, le courant électrique agissant comme intermédiaire. On peut arriver à la même démonstration d'une manière encore plus saisissante : un petit cube en cuivre *m* (fig. 44) est suspendu entre les pôles d'un puissant électro-aimant S, à l'aide d'un fil de soie tordu et tourne rapidement sur lui-même par l'effet du fil qui se détord, vient-on à faire passer le courant dans les bobines le cube s'arrête dans la position où il se trouve malgré la force de torsion.

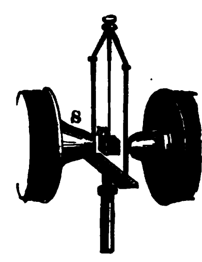


Fig. 44.

Ces expériences sont importantes car elles montrent qu'autour des conducteurs traversés par les courants et autour des aimants, l'éther n'est pas dans la condition de celui qui environne les corps à l'état naturel. Mais, quand on essaye de se faire une idée précise de l'arrangement des atomes éthérés, des difficultés immenses se présentent, car nos sens n'ont aucune prise sur ces atomes. Malgré la possibilité d'expérimenter directement sur les fluides pesants et de varier les procédés de recherche, on n'a pas encore réussi à comprendre le jeu des pressions dans les couches liquides situées autour d'un corps en mouvement. Il n'est donc pas étonnant que nous soyons réduits à faire des conjectures sur la manière dont les choses se passent dans

un milieu qui échappe complétement à la vue, et dont les propriétés sont totalement différentes de celles de la matière pesante. Quoi qu'il en soit, en procédant par voie d'induction, et en acceptant les analogies que nous présentent les fluides en mouvement, nous pouvons hasarder les hypothèses suivantes. Autour du courant principal, en vertu de la diminution de pression survenue dans le rhéophore de ce courant, très-probablement il se développe une sorte de remous qui, dans les substances isolantes donne naissance à des oscillations, c'est-à-dire à des courants infiniment petits, et dans les corps bons conducteurs, produit une circulation intérieure définie. Dans les deux cas, l'équilibre de pression est troublé au sein de toute la masse, d'où il résulte que le milieu environnant prend un nouvel état d'équilibre. Si le corps au sein duquel les actions se manifestent est en repos, tout mouvement intérieur cesse aussitôt que ses parties se sont agencées pour une nouvelle disposition de stabilité. Lorsque le corps n'est pas fixe, exemple le disque de l'appareil de Foucault, l'éther intérieur est ébranlé successivement dans les différentes parties de son étendue, d'où résulte, par effet de mouvement relatif, un changement continuel des points d'action, et par suite une agitation considérable de l'éther intramoléculaire qui, se communique à la matière pesante et se traduit par une élévation de température. Voilà de quelle façon dans l'expérience du disque tournant le travail mécanique se transforme en chaleur par l'intermédiaire du courant électrique.

On se demandera peut-être comment, lorsqu'un fil est traversé par un courant, un autre courant peut y naître et renforcer le courant primitif, phénomène qui se produit dans les spirales d'une grande longueur. La réponse est facile. Un fil, même d'un faible diamètre, représente on ne peut en douter, un canal dont la section est énorme relativement à l'expansion moléculaire,

et les courants employés dans la pratique ne parviennent jamais à imprimer du premier coup la plus grande vitesse possible à toute la masse d'éther contenue dans le rhéophore ; auquel cas le fil serait volatilisé. En réalité, ordinairement, suivant l'axe du fil interpolaire s'établit une veine de fluide éthéré qui possède la vitesse maximum, et les parties périphériques sont relativement passives; de même nous voyons dans un fleuve le cours de l'eau être beaucoup plus rapide vers le milieu du lit qu'en tout autre point. Alors toutes les couches conductrices situées autour de l'axe des rhéophores sont induites par l'action du courant circulant le long de cet axe, peu importe du reste que ce courant soit ou ne soit pas celui qui, un instant avant, traversait la spire précédente. On s'explique ainsi pourquoi l'intensité des courants d'induction devient plus grande lorsqu'on rapproche les unes des autres les spires de l'hélice inductrice; en effet, de cette manière le courant principal influence les parties de la masse éthérée qui n'ont pas encore pris la vitesse maximum dont elles sont susceptibles, et il agit exactement comme le ferait un courant extérieur au système.

C'est par un mécanisme de ce genre que, dans un fil traversé par un courant, peuvent s'en développer plusieurs autres qui se propagent tous indépendamment les uns et les autres, au moins dans de certaines limites, et qui pour se manifester à nous doivent parvenir jusqu'aux extrémités du rhéophore. L'observation ayant montré que lorsqu'un courant traverse un long conducteur, plusieurs fois replié sur lui-même, le mouvement électrique subit un notable ralentissement, cela prouve qu'il doit surmonter non-seulement l'inertie de l'éther formant le courant principal, mais encore celle de l'éther ambiant. Or, comme la force produite par la première impulsion est toujours très-faible eu égard à celle qui peut animer la

totalité de l'éther, la masse mise en mouvement et la vitesse de l'éther augmentent à mesure que les tours de l'hélice et, par conséquent, les impulsions du courant se multiplient davantage.

La forme des ondes électriques, avons-nous dit, n'est pas la même au commencement et à la terminaison d'un fil; en outre, elle varie à l'infini avec la résistance des conducteurs et du milieu ambiant, avec la manière dont le courant est ouvert, etc. On comprend dès lors la variété et la multiplicité des phénomènes lumineux qui accompagnent la décharge des ondes soit dans les milieux raréfiés, soit dans les gaz à la pression ordinaire, et si l'on cherchait à expliquer tous les détails, autant vaudrait chercher la raison de la diversité des formes que présente un jet liquide lorsqu'on change la forme des orifices et l'intensité de la charge. Tous ces phénomènes ont le mouvement pour origine et se résolvent dans le mouvement, le mécanisme de la transformation est encore obscur en plusieurs points, mais la théorie n'en demeure pas moins parfaitement établie.

A l'appui de la doctrine exposée ci-dessus, et en manière d'éclaircissement, nous citerons quelques faits remarquables observés en hydraulique, car ils ont une grande analogie avec les phénomènes fondamentaux de l'induction.

Quand le fond d'un récipient A B présente un orifice muni d'une soupape conique C, vient-on à la soulever légèrement, aussitôt, en vertu d'une sorte d'aspiration exercée par le liquide qui s'échappe, elle est violemment réappliquée sur l'orifice.

Or, si à cette soupape on adapte un tube de verre DC (fig. 45) qui la traverse de part en part suivant son axe et s'élève au-dessus de la superficie libre du liquide dans le réservoir, lorsqu'on la soulève de façon à vivement donner passage au liquide, au même moment une colonne

liquide s'élance dans le tube avec une telle force, qu'elle jaillit par l'extrémité D. C'est là purement et simplement un effet de la force vive du liquide entrant dans le tube. Ce phénomène n'a pas encore été signalé par les auteurs, et nous le citons parce que le jaillissement de l'eau dans le tube CD, au moment de la sortie de ce liquide par l'orifice L, est comparable au courant induit qui, lors de la clôture d'un circuit, se développe en sens contraire du courant inducteur.

Imaginons maintenant un siphon DF (fig. 46) adapté à l'extrémité supérieure du tube D C et recourbé de telle sorte que l'autre extrémité F de sa plus longue branche regarde le niveau de l'eau dans le réservoir. Supposons en outre la longueur du siphon telle que son ouverture F

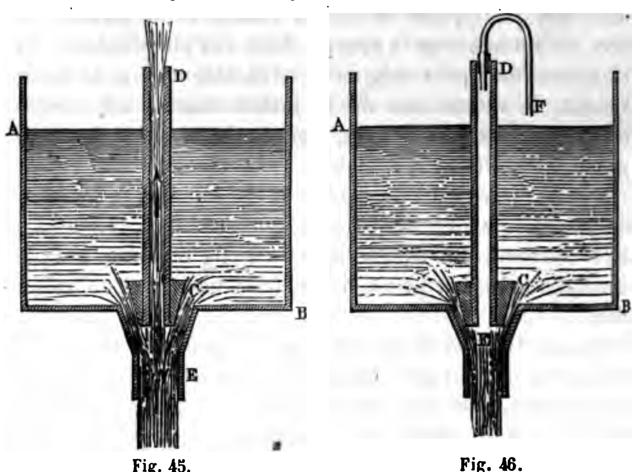


Fig. 45. Fig. 46.

puisse plonger dans le liquide au moment où la soupape ferme l'orifice E; cela posé, aussitôt que l'on arrête l'écoulement du liquide en fermant la soupape, il se produit dans le tube CD une absorption suffisante pour

amorcer le siphon et déterminer un courant liquide dirigé dans le sens de celui qui existait tout d'abord.

Il serait facile de multiplier les exemples de ces curieux phénomènes restés inaperçus jusqu'ici, mais ceux que nous venons de citer suffisent. Nous ajouterons seulement que dans un curieux appareil, l'*injecteur Giffard*, on a utilisé ces pressions négatives d'une manière très-ingénieuse, de telle sorte qu'un jet de vapeur comprimée à plusieurs atmosphères, en vertu de sa seule vitesse, traverse l'air libre sans se disperser.

Le présent chapitre se résume dans les quelques conclusions suivantes :

Les propriétés les plus caractéristiques des fluides en mouvement, le coup de bélier et la communication du mouvement dans le sens latéral, se retrouvent dans le flux électrique. En outre, lorsqu'un courant est interrompu brusquement, de telle sorte que la vitesse de l'électricité soit accumulée à l'extrémité du rhéophore, cette extrémité polaire présente une tension statique proportionnelle à la masse du fluide accumulé et à la vitesse dont il est animé. Nous reconnaissons ainsi plus clairement que jamais la véritable cause de la tension électrostatique; nous voyons qu'elle consiste en *un accroissement de la masse et de la vitesse de l'éther renfermé dans un conducteur lorsque des obstacles s'opposent à sa libre diffusion*.

Cette façon de concevoir la tension statique nous sera d'une grande utilité quand il s'agira d'expliquer les phénomènes qui en dépendent.

CHAPITRE IX

SOLUTION DE QUELQUES OBJECTIONS FAITES A LA THÉORIE PRÉCÉDENTE

Les phénomènes d'induction achèvent de nous imposer, pour ainsi dire, la persuasion que l'électricité est quelque chose de plus qu'un simple mouvement de la matière pesante. Ces expériences apprennent quelle part d'action revient au milieu isolant et au corps conducteur, et il est impossible de ne pas reconnaître l'influence d'une masse animée de translation et dont le mouvement satisfait à toutes les lois de l'écoulement des fluides. Si l'on parvient à démontrer que les phénomènes d'induction peuvent se produire sans l'intervention d'un fluide distinct de la matière pondérable, nous nous laisserons convaincre avec un véritable plaisir, car de cette manière le but de notre travail sera complétement atteint, puisqu'on faire table rase de toutes les forces abstraites, de tous les agents qui échappent à nos sens. Malheureusement, pour le moment, l'hypothèse éthérée est la seule qui permette d'expliquer tous les faits le plus simplement et le mieux.

Nous n'ignorons pas les objections adressées à ce système, mais toutes ne sont pas insolubles. Ainsi, faisant de l'éther une vraie matière, mais dans un état autre que celui propre à la matière grossière, nous n'avons pas à nous arrêter sur les difficultés soulevées par les physiciens adversaires déclarés d'un fluide immatériel. Toutefois nous ne devons pas passer sous silence le système soutenu par une grande autorité scientifique de ce siècle qui, repoussant l'hypothèse d'un fluide universel et renouvelant les idées de Fusinieri, déclare hautement que l'éther est une

pure imagination complétement inutile. Pour nous, sans prétendre qu'un fluide universel, l'éther, soit indispensable (car quel homme pourrait prononcer sur une nécessité absolue), nous regardons néanmoins les arguments fournis contre la théorie de l'éther comme facilement réfutables, et même il est nécessaire de nous livrer sur ce point à une discussion critique.

Premièrement, ceux qui refusent d'admettre un fluide occupant tout l'univers, loin de repousser les agents abstraits et immatériels, comme on serait porté à le croire au premier examen, ne font que recourir sans cesse à ces forces imaginaires, sans jamais se donner la peine d'attacher un sens physique aux mots dont ils font usage. Si, entraînés par l'exemple, nous nous contentions d'employer des termes conventionnels et que nous ne nous préoccupions nullement d'en donner une définition exacte et de fixer leur véritable signification physique, il nous serait très-facile de bâtir une théorie sans avoir besoin de l'éther. Nous aussi pourrions dire : « Les attractions et les répulsions ordinaires des corps électrisés ne présentent pas plus de difficultés, lorsqu'on les considère comme produites par un changement dans l'état ou dans les rapports de la matière affectée, qu'on n'en trouve à expliquer l'attraction de la terre par le soleil ou d'une balle pesante par la terre [1]. » Mais pour avoir dit cela, le problème est-il devenu plus clair?

En quoi consiste le changement d'état et les rapports dont il est ici question? Comment expliquer l'attraction des astres par le soleil et la chute des corps graves vers la terre?

Voilà la question qu'il fallait résoudre, et en se bornant à montrer l'analogie des deux phénomènes on la laisse subsister toute entière. Sans doute, deux molécules

[1] Grove, *Corrélation des forces physiques*, p. 121, 1866.

qui se combinent peuvent se comparer à deux planètes qui se précipitent l'une sur l'autre ; mais d'où vient ce mouvement? La comparaison faite jadis par Mayer n'est pas une explication.

Quiconque a l'expérience de la philosophie naturelle, reconnaîtra que de cette manière on résout un problème difficile en le faisant retomber dans un autre encore plus difficile. « L'hypothèse d'un fluide (dit en continuant l'auteur cité plus haut) n'est pas jugée nécessaire pour rendre compte des phénomènes dépendant de la gravité ; elle ne doit donc pas l'être davantage pour rendre compte des phénomènes de l'électricité. » Si quelqu'un ne se déclare pas satisfait de cette argumentation que lui répondra-t-on? On lui dira, comme cela est écrit plus loin, *c'est un mystère!* Mais avec les mystères on ne fait pas la physique, répliquerons-nous. Et le mystère invoqué par l'éminent physicien ne vient pas à l'appui de sa théorie, car c'est précisément ce mystère que la science moderne essaye de dévoiler.

Du reste, contrairement à ce que semble croire le savant dont nous discutons les idées, il n'est point absurde de regarder la gravité comme due à l'action d'un milieu. Bien plus, nous avons le droit en abordant le problème, de conclure comme corollaire nécessaire ce que d'autres érigent en principe fondamental. Les faits nous apprennent que toute condensation de l'éther produit une attraction ; partant de là rien ne nous empêche de faire un raisonnement précisément inverse de celui qui nous est opposé et de dire : les attractions électriques sont certainement l'effet d'un fluide ; donc un fluide, étant capable de produire des attractions, peut déterminer la gravité, et pour soutenir notre proposition nous ne serions pas forcés de préciser le mode d'agir du fluide dans ces conditions. Mais laissons un moment de côté la comparaison des phénomènes électriques avec

ceux de la gravité. Nous y reviendrons plus loin sur ce sujet. Toutefois nous ferons remarquer que si réellement les attractions électriques ne diffèrent en rien par leur mécanisme et leur principe de celles attribuées à la gravitation, néanmoins sous certains rapports elles répondent à nos recherches plus clairement que ne l'a fait jusqu'à présent la gravité. Par conséquent, celle-ci pourrait demeurer un mystère alors que le secret des attractions électriques nous serait déjà connu.

A entendre certains autres savants, l'hypothèse de l'éther est inutile, parce que ce fluide étant toujours associé à la matière pesante, en est, disent-ils, un compagnon nullement indispensable, les forces propres à la matière elle-même suffisant pour tout expliquer. Nous répondrons : L'existence de l'éther est démontrée incontestablement par la théorie de la lumière, puisqu'il agit à travers les espaces célestes en l'absence de toute matière pondérable. Les phénomènes de l'électricité nous conduisent aussi à admettre l'éther, et là seulement il serait le compagnon inséparable de la matière pondérable. L'hypothèse éthérée ne doit pas être rejetée pour cette raison du moment qu'elle permet d'expliquer les faits avec une plus grande facilité, d'autant plus que jusqu'à présent elle a été reconnue absolument nécessaire dans une foule de circonstances; vouloir l'écarter quand elle s'offre tout naturellement à l'esprit, ce serait agir contre le bon sens.

L'occasion se présentant de parler de ces forces dont certains auteurs dotent la matière très-gratuitement, afin de lui donner qualité pour suffire à tout, nous demanderons à les connaître autrement que par leur *nom*, nous voudrions que l'on nous apprît en quoi elles consistent et comment elles agissent. Car, à notre sens jusqu'à présent, la seule force que l'expérience ait reconnue comme appartenant en propre à la matière est sa masse animée de

vitesse, et nous tenons pour une imagination toute autre force qui ne se réduit point à cela[1].

Si quelque physicien, laissant de côté l'hypothèse de l'éther, réussit à expliquer tous les phénomènes de la lumière et de l'électricité à l'aide de la seule matière pondérable en mouvement, nous sommes prêt à accepter sa théorie.

L'objection tirée de ce que la matière pesante est sans cesse accompagnée par l'éther et qui semblait à Fusinieri d'une grande valeur a été reproduite par Grove (p. 127), lequel pose le dilemme suivant : « Admettons que l'éther pénètre les pores de tous les corps, sera-t-il lui-même conducteur ou non-conducteur? S'il est non-conducteur, c'est-à-dire si l'éther est incapable de transmettre l'onde électrique, l'hypothèse éthérée de l'électricité tombe nécessairement, mais si c'est le mouvement de l'éther qui constitue ce que nous appelons la conductibilité de l'électricité, alors les corps les plus poreux ou ceux qui sont les plus perméables à l'éther seront les meilleurs conducteurs; Or ce n'est pas là ce qui a lieu. »

La première partie de cette argumentation ne porte pas. Notre théorie admet que l'éther est conducteur, c'est-à-dire capable de transmettre le mouvement électrique; mais que, sous ce rapport, on ne doit pas l'envisager indépendamment de la matière pesante à laquelle il est associé. Dans les métaux ses mouvements sont libres, dans les isolants, au contraire, et dans l'espace, ses mouvements sont gênés; toutefois, l'onde se

[1] Le professeur Volpicelli de Rome vient de publier une très-amère critique des idées présentes et il nous reproche de *nier les forces.* (V. *Giornale arcadico*, t. LVI, 1868, p. 250.) Il est évident que le savant professeur n'a rien compris à nos théories, et la lecture de notre livre ne lui serait pas inutile, car sans doute il ne nous a pas lu, puisqu'il nous reproche de faire dériver la gravité *de la réflexion des rayons solaires à la surface de la terre qui les renvoie vers le soleil lui-même!!*

transmet également dans ces corps, mais d'une manière différente et variant avec le mode d'agrégation moléculaire qui oblige le mouvement à se résoudre en vibrations transversales. En quoi consiste ce mode de groupement moléculaire, nous ne le savons pas au juste, mais nous avons presenté quelques conjectures à ce sujet (livre II, chapitre VI). La seconde partie de l'argumentation pèche par la base, car l'auteur confond assez habilement la *porosité* des corps avec leur *perméabilité* à l'éther, c'est-à-dire deux propriétés complétement différentes même au point de vue des mouvements calorifiques. En effet l'aluminium est notablement meilleur conducteur que le plomb; cependant sa porosité doit être beaucoup plus grande que celle du plomb, sa densité étant moindre ; de même le fer, le platine, deux métaux dont la porosité est parfaitement établie, puisqu'ils se laissent traverser par les gaz, et enfin le palladium qui absorbe une énorme quantité de gaz jusqu'à augmenter de volume, devraient être pour la chaleur des conducteurs plus parfaits que les autres métaux, conclusion radicalement fausse. Ce qui est vrai pour la chaleur l'est aussi pour l'électricité : que celle-ci soit ou non un mouvement de la matière pondérable, la perméabilité à l'éther ne peut marcher de pair avec la porosité. Bien plus, en se plaçant à un point de vue plus général, cela reviendrait à confondre la mobilité moléculaire des corps pesants avec leur porosité, de telle sorte que l'on pourrait raisonner ainsi : la mobilité des corps dépend de l'espace existant entre les molécules, mais les substances les plus poreuses ont les espaces intermoléculaires les plus grands, donc les corps les plus poreux sont les plus mobiles et par là les meilleurs conducteurs. Absurdité manifeste, car le mercure et l'eau sont assurément plus mobiles et moins poreux que le liége. Ainsi nous échappons aisément à ce terrible dilemne.

Grove poursuit en insistant : « De plus, si un métal et l'air environnant sont tous deux pénétrés par l'éther, comment se peut-il que l'onde électrique affecte l'éther dans le métal et n'ébranle pas l'éther dans le gaz?

Cette difficulté, qui est plus sérieuse que la précédente, suppose que l'éther dans le milieu ambiant gazeux n'est pas ébranlé; or cela n'a pas lieu. L'éther dans le gaz est ébranlé mais en tant que le permet la nature des milieux isolants, c'est-à-dire que les mouvements longitudinaux indéfinis étant très-difficiles, il s'y produit seulement une agitation et un déplacement atomique ou moléculaire qui nous est démontré par les phénomènes de l'induction.

Prétendre que l'électricité d'un conducteur communique au milieu isolant circonvoisin un mouvement semblable au sien, reviendrait à prétendre que les parois d'un tube dans lequel un courant liquide ou gazeux est établi prennent un mouvement identique à celui du fluide. Il n'est donc nul besoin d'adjoindre à l'hypothèse éthérée de l'électricité un certain nombre de suppositions accessoires, mais en raisonnant sur les propriétés de l'éther telles que l'optique et l'étude des courants nous les ont révélées on reconnaît que relativement à l'éther la constitution des corps isolants et celle des conducteurs sont complétement différentes et que dans les premiers l'éther paraît avoir toutes les propriétés des solides et dans les seconds celles des fluides.

Les phénomènes de rupture, de transport et de volatilisation causés par les décharges électriques sont certainement des effets qui appartiennent à la matière pondérable et qui en dépendent, mais nous pouvons nous demander : Quelle absurdité y a-t-il à admettre que l'éther ne puisse se mettre en mouvement sans entraîner avec lui la matière pondérable (point sur lequel on n'est pas fixé jusqu'à aujourd'hui)? Aucune, assurément. Bien plus,

une semblable supposition ne présente rien d'extraordinaire, car pour se réaliser elle exige seulement les conditions qui rendent possible le déplacement des corps, c'est-à-dire qu'ils soient plongés dans un milieu ayant, comme les fluides, une mobilité indéfinie; il faut, en outre, dans le cas considéré que cette propriété soit spéciale à une classe déterminée de corps pesants lesquels pourront être assimilés à des espèces de canaux permettant d'établir à chaque instant l'équilibre de tension. Peu importe, du reste, que les communications soient établies par des canaux continus comme le sont les fils métalliques, ou bien qu'elles se produisent violemment par une série de molécules détachées des corps par l'agitation, la pression, etc.

Les phénomènes étant envisagés de la sorte, on arrive à expliquer les effets les plus extraordinaires des décharges électriques sans admettre aucune de ces actions mystérieuses qui supposent une transformation de la matière ou tout au moins des conditions dont ne peuvent nous donner une idée les phénomènes connus. Comment, par exemple, concevoir que la vapeur d'eau, par le seul fait de sa condensation, puisse devenir l'énorme puissance que nous appelons la foudre; comment pourrait-elle condenser les molécules de soufre et de fer disséminées dans toute la masse atmosphérique, ainsi que cela devrait être d'après les *idées* de Fusinieri. A la production d'effets aussi considérables une cause est au moins nécessaire, et puisque la foudre n'est ni l'eau, ni l'oxygène, ni l'hydrogène, ni aucun autre des éléments de l'atmosphère à l'état d'atténuation, et que le fer ni le soufre ne peuvent exister dans chacun de ces atomes d'air desquels la foudre tire son existence, force est ou d'admettre une métamorphose de la matière élémentaire, ou de reconnaître comme cause du phénomène un changement survenu dans l'équilibre de quelque matière distincte de la matière pesante, et ce serait cette matière spécifique qui

acquérant une vitesse énorme entraînerait les particules pondérables qu'elle rencontre sur sa route.

Grove a souvent recours à des renversements subits de polarisation. Ces expressions sont d'un heureux emploi pour représenter les phénomènes; mais nous désirerions savoir en quoi consiste l'état polaire dont il est question. Est-elle une simple disposition ou orientation dans un sens défini des solides moléculaires ou atomiques? Alors il faut démontrer comment un semblable effet peut se produire sans l'action d'un principe abstrait, appelé *force*, et en repoussant toute influence d'un milieu.

Ce n'est pas le désir de critiquer qui nous a entraîné à présenter les réflexions précédentes au sujet d'un ouvrage pour lequel nous professons la plus grande admiration, car on y trouve exposée avec un art admirable la transformation des forces physiques les unes dans les autres. Notre but est autre. Le livre de la *Corrélation des forces physiques* est dû à une plume qui fait autorité dans la science; les arguments y sont présentés de la façon la plus séduisante, et enfin, il est écrit dans un style inimitable; c'était un obstacle sérieux jeté en travers de la route que nous voulons parcourir, et il nous a fallu l'écarter avant de passer outre.

Tandis que d'un côté, dans l'explication des phénomènes de la nature, quelques savants repoussent l'influence d'un milieu quelconque autre que la matière pondérable elle-même, il y en a par contre un certain nombre qui basent toutes leurs théories sur des agents impondérables, et, à cette fin, ils en ont imaginé un nombre véritablement énorme. Ainsi font ceux qui admettent deux fluides électriques, un positif et un négatif.

A la vérité, pour la majorité des physiciens, ces fluides sont de simples expressions destinées à faciliter le langage; ils ne les acceptent pas comme des réalités, et se résoudraient facilement à les abandonner.

Dans le cas particulier de l'électricité, il est aisé de

réduire les deux fluides à un seul. En effet, les expériences électrodynamiques ne nous montrent jamais les deux fluides séparés, et les plus chauds partisans de la théorie de Dufay avouent que tous les phénomènes peuvent s'expliquer à l'aide d'un seul fluide. Si les deux fluides ne sont d'aucune utilité en électrodynamie, évidemment on peut s'en passer quand il s'agit de rendre compte de l'électricité statique, et revenir aux idées de Franklin, qui expliquait les effets attribués au fluide négatif, par une électrisation en défaut. Du reste, de tous les phénomènes examinés jusqu'ici, il n'en est aucun dans l'explication duquel il faille nécessairement recourir à ce fluide négatif considéré comme réalité distincte.

Nous avons dit combien étaient peu concluantes les preuves fondées sur la forme des explosions, sur les apparences lumineuses d'une pointe négative, et celles déduites de l'élévation de température plus grande au pôle négatif, car tous ces phénomènes dépendent d'une simple expansion ou mouvement de la matière pondérable, et il n'est nullement démontré que les manifestations électriques ne doivent pas différer suivant qu'elles ont lieu aux points de sortie ou aux points d'entrée du flux électrique. Il peut très-bien se faire que (comme cela arrive dans les fluides pesants), il se produise une agitation beaucoup plus vive et plus tumultueuse lorsque le courant électrique sort d'un conducteur, que lorsqu'il s'y introduit[1]. Ne voyons-nous pas dans l'injecteur Giffard, cité ci-dessus, des diffé-

[1] M. Du Moncel, qui a cru observer une différence entre les courants voltaïques et les courants induits, a beaucoup insisté sur ce que le pôle négatif du courant est celui dont la température s'élève le plus haut ; et cependant on trouve dans son ouvrage divers cas où, au contraire, l'échauffement maximum appartient au pôle positif. (Voy. p. 37 et 38 et p. 134 de sa Notice sur la machine de Rhumkorff.) Il nous semble qu'il est aussi inutile de discuter sur ces détails que de vouloir distinguer soigneusement les unes des autres les diverses formes des veines liquides, selon qu'elles sortent d'un orifice ou

rences de pression étonnantes dans la vapeur qui entre dans chaudière et celle qui en sort produites par des variations de vitesse et des combinaisons dans la forme des orifices. Les esprits pratiques préoccupés exclusivement des applications utiles de la science, et pour lesquels le résultat est tout, regarderont comme parfaitement oiseuse la question de savoir s'il existe un ou deux fluides, puisque dans les deux hypothèses, les faits, dit-on, s'expliquent également bien.

A cette observation, nous pouvons répondre de plusieurs manières. Premièrement, étant accordé pour un instant que l'explication des faits soit également facile dans les deux théories, il convient néanmoins d'accorder la préférence au système qui représenterait les phénomènes de la manière la plus simple, et, sous ce rapport, la théorie d'un seul fluide est la meilleure. D'un autre côté, si la discussion à laquelle nous nous livrons en ce moment, importe peu au physicien expérimentateur, il n'en est pas de même pour le physicien philosophe. Le premier se contente de classer les faits sous quelques points de vue généraux; mais le second, cherche en outre à pénétrer le mécanisme des phénomènes de la nature. On échoue fréquemment dans les recherches purement spéculatives; néanmoins, le désir d'approfondir les problèmes n'est point blâmable. Nous croyons qu'un sage empirisme, consistant à vérifier à l'aide de l'expérience les déductions fournies par le raisonnement, est une méthode scientifique précieuse; car, loin de fournir des ailes à l'imagination humaine, elle lui impose un lest suffisant pour la retenir loin du domaine de la fantaisie vers lequel elle est toujours prête à s'échapper. Voilà pourquoi dans ce livre nous ne nous sommes jamais avancé

qu'elles y pénètrent. Ces formes peuvent varier à l'infini, mais assurément leur étude ne conduira jamais à la découverte d'un nouveau principe d'hydraulique.

d'un seul pas sans avoir éclairé notre route en mettant à profit toutes les ressources de l'expérience. A notre avis, on doit accepter comme principes un petit nombre de faits fondamentaux et y ramener tous les autres phénomènes; de cette façon, il est possible de réduire le nombre trop considérable de forces abstraites qui encombrent la physique, et pour le moins on soulage la mémoire.

Mais traiter avec une méprisante hauteur toutes les recherches faites dans la voie synthétique, et les regarder comme des tentatives déraisonnables, nous paraît une très-grave erreur; à ses belles époques la science n'a jamais eu ces tendances, et aujourd'hui les savants les plus distingués sont très-éloignés de professer une semblable opinion. La véritable philosophie ne consiste pas à imaginer une cause mystérieuse pour expliquer chaque fait particulier, mais, au contraire, autour d'un même principe elle groupe des faits en aussi grand nombre que possible. C'est ainsi qu'elle a réuni comme effets d'une cause unique le mouvement orbitaire des planètes, la chute des graves à leur surface, le flux et le reflux des océans qui les recouvrent. Parce que l'on est déjà parvenu à ce remarquable résultat théorique, il ne faut pas croire que la cause de ces phénomènes doit être éternellement inconnue de nous; bien au contraire, il importe de se convaincre que tôt ou tard nous arriverons à saisir le lien qui la rattache aux autres forces de la nature. A nos yeux, déclarer impossible tout progrès dans cette voie serait aussi téméraire que tenter la solution de ces problèmes avant de posséder les connaissances et les termes de comparaison nécessaires.

Le grand Newton disait : « Déduire des phénomènes de la nature deux ou trois principes généraux de mouvement, ensuite faire voir comment les propriétés de tous les corps et les phénomènes découlent de ces principes constatés,

serait faire de grands pas dans la philosophie naturelle, malgré que les causes de ces principes demeurassent cachées[1].

Nous avons cité ces quelques lignes, car elles expriment clairement notre but; nous voulons, autant que faire se pourra, montrer que les manifestations électriques se ramènent à de simples modalités de mouvement. Dès lors, ayant jusqu'ici envisagé un très-grand nombre de phénomènes comme les effets d'un flux continu, nous sommes maintenant obligés d'expliquer par le même mécanisme les phénomènes de tension.

Avant d'aborder cette étude, nous déclarerons que là où d'autres, dans leurs théories, ont recours à des forces abstraites, à des agents mystérieux, nous n'hésitons pas à faire intervenir la pression d'un milieu, parce que cette action se déduit logiquement et physiquement de celle du flux lui-même.

CHAPITRE X

PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-STATIQUES. — IDÉE GÉNÉRALE DE LA TENSION ET DE SES EFFETS.

On désigne particulièrement sous ce nom les phénomènes que présentent les corps électrisés par un moyen mécanique, tel que le frottement, la percussion, etc. Ordinairement dans les traités de physique, l'exposé des effets de tension précède celui de l'étude des courants ; et les auteurs qui se proposent simplement de présenter la suc-

[1] Newton, *Optic.*, lib. III, question XXXI : « Ex phænominis naturæ, duo vel tria derivare generalia motus principia, et deinde explicare quemadmodum proprietates et actiones rerum corporearum omnium ex principiis istis manifestis consequantur, id vero magnus esset factus in philosophia progressus etiamsi principiorum istorum causæ nondum essent cognitæ. »

cession des faits ont raison de suivre cette méthode. Pour nous, qui supposons toutes ces notions expérimentales déjà acquises, et qui voulons profiter de l'avantage que l'on peut tirer de la connaissance des phénomènes dynamiques, afin de connaître ceux dus aux actions dites habituellement électro-statiques, nous avons réservé l'étude de ces derniers pour la fin. Mais avant de donner de ces phénomènes une théorie quelconque, il est bon de résumer leurs lois fondamentales.

1° *Toute électricité de tension suppose un mouvement moléculaire, antécédant, qui en est la cause efficiente.* Certains physiciens ont voulu rapporter les effets statiques de l'électricité à des actions chimiques, mais le frottement et les autres agents mécaniques sont des causes d'ébranlement moléculaire suffisamment énergiques pour engendrer l'électricité. Les phénomènes électriques apparaissent même sous l'influence d'excitations assez légères; seulement, dans ces cas, la réaction se localise à la couche superficielle, là où les molécules jouissant d'une plus grande liberté, leur équilibre peut être rompu plus facilement. Le mouvement ne pénètre pas la masse du corps et n'en modifie pas la cohésion; il se borne à modifier la surface, et la tension ne dépend pas seulement de la charge absolue, mais aussi de la forme du corps; ainsi la tension est plus intense à l'extrémité des pointes. En général, partout où les molécules présentent une liberté assez marquée, leur agitation devient plus facile à produire, elle atteint même souvent une intensité telle, qu'elles se séparent de leurs voisines.

2° *La condition moléculaire est encore ici la cause qui entre deux corps donnés, parfaitement homogènes du reste, détermine le sens de l'électrisation, et fait que l'un des deux est positif ou négatif par rapport à l'autre.* Ainsi, deux corps de même nature et de même couleur étant frottés l'un contre l'autre, celui-là s'électrise négativement qui

subit la friction la plus énergique, et l'autre se constitue à l'état positif. Une lame de verre dépolie frottée contre une autre bien polie, s'électrise toujours négativement, et en général le plus chaud devient négatif.

3° *Les phénomènes de tension se manifestent seulement après la séparation des corps qui, par leur réaction mutuelle, déterminent la charge électrique*. Nous l'avons déjà dit plus haut : aussi longtemps que le contact entre deux corps persiste, ils ne présentent aucune tension électrique, non parce que l'équilibre moléculaire n'est pas modifié, mais parce que l'action de l'un des corps dans un certain sens contre-balance et neutralise l'action de l'autre dans le sens opposé. Souvent un corps semble en équilibre absolu et ne s'y trouve que d'une manière relative, cela se présente toutes les fois qu'il est dans la sphère d'activité d'un autre. Semblable chose arrive pour la chaleur; le même corps indique un excès ou un défaut de tension thermique, selon qu'il est transporté dans un milieu à telle ou telle température. Par conséquent, l'état électrique absolu d'un corps ne nous est pas plus connu que la température absolue; ce qui ne nous empêche pas d'étudier avec précision les états électriques relatifs, de même que nous l'avons déjà fait lorsqu'il s'agissait des températures relatives.

4° *Quel que soit le procédé suivi pour développer l'électricité de tension, il s'en dégage autant de signe positif que de signe négatif*. On le vérifie aisément dans l'électrisation par procédé mécanique : il suffit de bien isoler deux corps, puis après les avoir frottés ou frappés l'un contre l'autre, de les séparer brusquement; si alors, à l'aide d'un conducteur, les corps constitués à l'état de tension sont réunis, on obtient un courant comparable à celui qui aurait une toute autre origine; la seule différence, c'est que les quantités d'électricité mises en mouvement par les actions mécaniques seules

sont toujours extrêmement faibles, ainsi que l'on s'en assure en les employant à produire une décomposition chimique ou une déviation galvanométrique; aussi, pour réussir dans les expériences, faut-il recourir à des instruments fort délicats, et s'entourer de précautions minutieuses. En définitive, c'est une simple différence de degré que l'on observe entre ces effets et ceux de même genre qui se manifestent dans tous les autres cas, où se produit une tension électrique en connexion virtuelle avec le courant.

Ces observations nous amènent à formuler la conclusion générale suivante. Il n'y a pas diversité de nature entre l'agent mis en activité dans les cas actuels de dégagement d'électricité, et celui dont nous avons parlé jusqu'ici. Une seule particularité différentielle mérite d'être signalée, c'est que dans le cas des sources chimiques et thermiques d'électricité, la quantité est beaucoup, et la tension peu de chose; dans les actions mécaniques électro-motrices; au contraire, la quantité est faible et la tension très-grande. Ces sources électriques présentent encore la particularité que le mouvement entier se passe exclusivement dans les couches superficielles. Mais la grande question est de savoir en quoi consiste la tension et comment s'expliquent les curieux phénomènes que présentent les corps au moment où ils sont envahis par elle; ce problème se représente le même dans tous les cas de développement d'électricité, et une fois résolu pour une classe de faits, il le sera pour toutes les autres.

Cherchons donc actuellement : 1° ce qu'est l'état de tension dans les corps; 2° quelle modification cet état fait subir au milieu environnant; 3° les effets de cette modification, c'est-à-dire les mouvements attractifs et répulsifs qui en résultent pour les corps pondérables.

Afin de savoir en quoi consiste l'état de tension, qu'on se

reporte aux conclusions du premier chapitre de ce livre, et l'on verra qu'il doit être envisagé comme un état d'exaltation de la force répulsive qui anime la matière, même quand elle nous paraît en repos. La nature de cette force est grandement mise en lumière par les propriétés des courants, car les corps que nous disons envahis par un courant électrique, sont animés d'un mouvement intérieur parfaitement analogue à celui des fluides, et entre la *tension* et le *courant* ont été constatés les rapports suivants :

1° Toute tension électrique est susceptible de donner lieu à un courant, que celui-ci soit un véritable flux d'éther simple, ou bien qu'il soit un flux d'éther mêlé à la matière pondérable;

2° Réciproquement, lorsque le mouvement circulatoire de ce flux est arrêté d'une manière quelconque, il se produit une tension;

3° Si, alors qu'il est en pleine circulation, le courant vient à être interrompu subitement, on observe un excès de tension positive à l'extrémité vers laquelle se dirigait la matière en mouvement, et un excès de tension négative à l'extrémité opposée, comme il arrive dans un fluide en mouvement en vertu de la vitesse acquise.

L'ensemble de ces faits prouve que le courant étant un transport de l'éther intérieur des corps : 1° *la tension n'est autre qu'une accumulation de ce même éther dans le corps que nous disons être électrisé en plus, et une diminution dans celui que nous nommons électrisés, en moins ;* 2° *l'action de la tension est parfaitement semblable à cette force qui, dans les fluides, constitue la pression.* En effet, la pression augmente dans une masse fluide par l'effet de deux causes différentes; l'accroissement de la masse, et l'accroissement de la vibration intérieure. Or, pendant l'arrêt d'un courant électrique, les deux causes

en question concourent à augmenter la pression, c'est-à-dire la tension[1].

Si donc nous voyons les corps affectés de la sorte exercer des attractions et des répulsions, il nous est impossible de ne pas regarder celles-ci comme des effets de cette pression spéciale. C'est elle qui en se transmettant du corps électrisé aux objets environnants, détermine les mouvements attractifs et répulsifs propres aux corps électrisés.

Telle est dans toute sa simplicité la conception que nous suggère immédiatement l'étude des phénomènes dus au courant ; il nous reste à développer cette manière de voir et à l'appliquer en particulier au cas des tensions engendrées par simple frottement ou autre acte mécanique.

Voici, dans ce cas, quelle idée on peut se faire des choses.

Sous l'influence d'une action mécanique, les molécules d'un corps sont agitées, et par suite l'éther interposé participe à leurs mouvements. Mais une même action mécanique ne peut communiquer à toutes les molécules une égale force vive ; pour les une, l'oscillation est plus rapide, et pour les autres, plus lente. L'intensité des vibrations moléculaires dépend donc de la nature des corps et de leur agencement intérieur. Là où les vibrations excitées artificiellement excèdent les limites de l'élasticité naturelle du milieu, l'éther lui-même est plus ou moins condensé ou raréfié autour des molécules. Si, pendant que le corps est dans cet état de trouble intérieur, on vient à le séparer brusquement en plusieurs parties, les surfaces mises à découvert conservent l'état dans lequel elles se trouvaient au moment où elles étaient en contact ; de telle sorte que les unes sont chargées d'une plus grande quantité d'éther et présentent une vibration moléculaire plus énergique, tandis que les autres se

[1] Voir le chapitre précédent.

trouvent dans des conditions précisément inverses. Donc lorsque deux corps en contact sont simultanément soumis à une certaine action mécanique, puis séparés brusquement, les surfaces terminales doivent se montrer dans le même état que les pôles d'une pile, c'est-à-dire que l'une aura un excès électrique, elle sera électrisée positivement, l'autre présentera un déficit électrique, elle sera électrisée négativement.

De cette façon, l'état des corps électrisés par frottement, a les rapports les plus étroits avec les cas de dégagement d'électricité par action chimique, tels que nous les rencontrons dans la pile voltaïque.

Maintenant il faut examiner quelle modification peut apporter au milieu ambiant, la charge en plus ou en moins d'un corps électrisé. Il s'agit ici, bien entendu, de milieu isolant, et il en est de même pour le corps; nous avons examiné ailleurs le cas d'un bon conducteur. Comme un milieu isolant, lorsque la charge ne dépasse pas certaines limites d'intensité, transmet forcément le mouvement couche par couche, il se développe dans les couches successives du milieu un mouvement accompagné de condensation et de raréfaction, qui, suivant les lois habituelles des ébranlements émanés d'un centre, se répandent au sein de la masse en s'affaiblissant en raison du carré des distances. Un corps électrisé a donc autour de lui un espace dans lequel la densité de l'éther change notablement de valeur aux diverses distances et où s'exercent des pressions inégales.

Le corps et le milieu ambiant, une fois constitués dans l'état que nous venons de signaler, les couches de ce milieu tendent sans cesse à l'équilibre, et s'il se rencontre des corps facilement mobiles dans le voisinage, ils peuvent être entraînés d'une région à l'autre par les réactions qui s'établissent entre le corps et le milieu ambiant jusqu'au rétablissement complet de l'équilibre de pression. De

là, des attractions et d'autres phénomènes sur l'analyse desquels il est nécessaire de nous arrêter.

Après ce coup d'œil jeté sur l'ensemble du système électro-statique, développons-en successivement les diverses parties.

Commençons par une remarque historique. La théorie de la pression n'est pas nouvelle, surtout en Italie, elle a été généralement admise par les premiers électriciens; mais plus tard, on l'avait abandonnée pour suivre la théorie des deux fluides ou pour se livrer à des combinaisons imaginaires de forces attractives et répulsives dont on dotait très-gratuitement la matière et l'électricité.

La discussion actuelle a pour objet de déterminer si ces forces abstraites sont absolument indispensables; et si quant à leur mécanisme les phénomènes électriques ne peuvent se concevoir comme de simples mouvements dus à des changements dans l'équilibre de l'éther, et comme des effets de pression, en donnant à ce mot le sens que nous avons maintes fois expliqué. Cette manière d'envisager les choses n'est nullement hypothétique, elle est l'expression rigoureuse des faits; car puisqu'il est établi que tout *courant empêché*, donne lieu à une *pression*, quoi de plus logique que d'attribuer à cette cause les phénomènes qui accompagnent constamment l'induction statique, c'est-à-dire les attractions et répulsions. Mais il nous faut encore aller plus loin et *montrer de quelle manière cette pression produit les phénomènes qui accompagnent les tensions électriques*.

Ce problème est tout différent du précédent; et, nous adressant aux physiciens qui déclarent ne croire qu'aux résultats directs de l'observation, nous pourrions leur dire que, peu soucieux de savoir le *comment* de la chose, nous nous bornons à constater ce fait fondamental : que si l'équilibre de la dose naturelle d'électricité appartenant à un corps quelconque, vient à être

rompu, aussitôt on obtient des attractions des répulsions, et tous les mouvements du genre de ceux que nous avons appelés mouvements de tension.

Telle pourrait être notre réponse, mais assurément elle ne saurait satisfaire quiconque ne s'arrête pas à un grossier empirisme, et nous avouons franchement notre désir de pénétrer plus avant dans la question, laissant volontiers de côté une réserve affectée. Toutefois, répétons-le encore, les idées dont le développement va suivre sont livrées comme des hypothèses simplement probables, utiles à signaler surtout, parce que nous espérons les voir en susciter de meilleures dans l'esprit de ceux qui entreprendront de nouvelles recherches sur cet important sujet. Nous citerons d'abord les points dont l'exactitude est, suivant nous, démontrée; ensuite nous passerons à ceux qui nous semblent probables.

En premier lieu, cherchons à expliquer comment se développent les attractions et répulsions statiques dans les corps électrisés. L'habitude a prévalu aujourd'hui de rendre compte des phénomènes électriques en imaginant des forces attractives et répulsives. Or, de l'existence de ces forces nous n'avons d'autres preuves que les faits qu'elles sont destinées à expliquer; ce sont de pures abstractions: aussi, avant d'admettre ces entités multiformes, on devrait au moins s'assurer si les phénomènes ne sont pas explicables autrement et d'une manière plus simple, car il y a un grave inconvénient à admettre aussi facilement qu'on le fait ordinairement un grand nombre de forces imaginaires. Et, d'ailleurs, les physiciens sont loin d'être d'accord sur la nature de ces forces. Quelques-uns croient qu'elles sont dues à la présence de deux fluides, l'un positif, l'autre négatif; d'autres pensent qu'elles agissent sur la matière elle-même par effet de polarité et que cette action peut se faire sentir à distance.

On connaît déjà ce que nous pensons des deux fluides.

Reste à examiner la *polarité*, expression aujourd'hui fort en faveur. Or, qu'est-ce que la polarité? entend-on par là *deux forces statiques égales et contraires* dont l'action est concentrée à l'extrémité d'une molécule infiniment petite; alors la résultante extérieure d'un pareil système doit être simplement nulle ou au moins elle doit varier avec la distance suivant une loi autre que celle trouvée par voie expérimentale, c'est-à-dire celle des carrés. La résultante extérieure sera nulle si la distance des pôles est infiniment petite, elle variera en raison inverse du cube des distances lorsque la distance des deux pôles opposés n'est pas négligeable[1]. J'ai dit forces égales, parce que, en dehors de cette condition la vraie polarité ne saurait subsister, et on ne pourrait qu'imaginer une force arbitraire n'ayant aucune signification naturelle. En outre, au sujet de cette polarité, on peut se demander : son existence dans les corps est-elle essentielle ou seulement accidentelle? si elle est immanente, comment se fait-il que dans les corps, sous l'influence des causes les plus légères, se manifestent alternativement tantôt l'une, tantôt l'autre des deux composantes du couple polaire; la question n'a donc pas fait un seul pas, et la difficulté se représente tout entière, puisqu'il reste à trouver l'agent qui détermine chaque fois le sens de la polarité, si bien que la cause principale du phénomène réclamant elle-même une cause déterminante, nous nous engagerions ainsi dans une série de causes successives sans jamais ar-

[1] Les actions exercées à une distance D seraient exprimées, pour le pôle positif, par la formule $\frac{M}{D^2}$ et, pour le pôle négatif, par cette autre $\frac{-M}{(D+x)^2}$. Si x est infiniment petit et négligeable par rapport à la distance finie, évidemment les forces sont égales; si x n'est négligeable que pour ses puissances supérieures à la troisième, la différence des deux forces variera en raison inverse du cube des distances.

river à une dernière, et de plus nous ne saurions pas davantage en quoi consiste l'état polaire. Ampère est le seul, à notre avis, qui ait réussi à formuler une notion exacte de la polarité. Il se fonde sur les rotations moléculaires, lesquelles, bien que très-petites exercent toujours une action égale et contraire en deux points opposés. En mécanique, on fut longtemps avant de connaître des phénomènes comparables à ceux de la polarité; mais, dans ces dernières années, la découverte des curieuses propriétés spéciales aux corps animés de rotation, l'étude de la composition de leurs mouvements ont fourni des faits remarquables très-propres à éclairer ces théories, jusque-là fort obscures. Toutefois, qu'on ne s'y méprenne pas, la considération de ces polarités ne donnera jamais directement l'explication des phénomènes électro-statiques.

Bixio a fait connaître une théorie fort ingénieuse des polarités chimiques basée sur les lois de l'équilibre. Supposons, dit-il, les molécules de volume différent; lorsqu'elles sont accolées, le centre de gravité du système ne coïncide pas avec le centre de figure, par conséquent la résultante des forces du courant doit orienter les molécules, de telle sorte que toutes les parties présentent leur centre de gravité dans une position homologue par rapport à la forme extérieure (comme on le voit dans une série d'aréomètres flottant au sein d'un même liquide). Par conséquent, les molécules les plus petites seront dirigées d'un même côté et il y aura une polarisation. Cette théorie n'échappe pas à l'écueil contre lequel toutes les autres viennent échouer; elle est insuffisante, parce qu'il reste à chercher la cause qui dispose les molécules de la façon indiquée. Ainsi la polarité ne peut jouer le rôle de force première, mais l'existence de l'éther une fois admise, elle permet d'expliquer un grand nombre de faits en mettant à profit les idées de Bixio.

Assurément, la tâche est plus facile lorsqu'on explique

les phénomènes en supposant des forces abstraites, principes internes agissant à distance; malheureusement il faut en imaginer un nombre si considérable que tous ceux qui ont examiné la question à ce point de vue, ont reculé devant une telle complication. Pour citer un seul exemple, Mossotti, dans un travail fort estimé, reconnaît la nécessité d'admettre un nombre vraiment énorme de forces, et de supposer à l'action de chacune d'elles des limites purement arbitraires. Ainsi il faut admettre : 1° une répulsion entre l'électricité et l'électricité; 2° une répulsion entre la matière et la matière; 3° une attraction entre l'électricité et la matière; 4° supposer la répulsion moindre que les attractions, pour ne pas se trouver en opposition flagrante avec la gravitation universelle.

Ces forces s'introduisent assez aisément dans les formules mathématiques, mais elles sont loin d'avoir la simplicité qui caractérise les puissances naturelles.

Les premiers électriciens et même quelques modernes ont expliqué les tensions électriques par des atmosphères électriques enveloppant les corps et s'étendant à une assez grande distance; mais cette hypothèse n'a pas résisté à l'observation rigoureuse des faits. La charge électrique ne dépasse pas la surface physique d'un corps et ne l'abandonne point, si ce n'est lorsqu'il communique avec un autre corps conducteur; dans le cas où le milieu qui enveloppe le corps est un isolant parfait, la charge électrique se conserve très-longtemps sur ce dernier. Grove assure que dans le vide les feuilles d'or d'un électroscope, rendues séparées par la répulsion électrique, demeurent divergentes pendant plusieurs semaines. De là une différence remarquable entre les tensions électrique et thermique; celle-ci se dissipant avec une rapidité beaucoup plus grande, il est très-difficile à conserver sur un corps.

La tension électrique présente une seconde particula-

rité. Elle passe d'un corps à un autre alors que le contact existe par un seul point, et l'équilibre s'établit immédiatement entre les deux corps. En cela elle se distingue encore de la tension thermique qui se propage en raison de l'étendue du contact; ce caractère différentiel a même une grande importance. Il faut conclure de là que dans un corps électrisé par voie mécanique, outre les mouvements des molécules pesantes, il y a un mouvement de l'éther distinct de celui qui constitue la chaleur, car l'éther seul, grâce à sa mobilité, qui dans les métaux égale celle d'un fluide, peut se remettre en équilibre avec une aussi grande facilité. Lorsque l'éther animé d'un semblable mouvement se communique à un conducteur isolé, celui-ci se charge absolument comme s'il avait été électrisé directement. Ces faits nous montrent que la tension électrique diffère de la tension thermique, et prouvent que c'est le passage rapide d'un fluide qui est susceptible d'envahir d'un seul coup toutes les molécules d'un corps.

La communication électrique s'établit facilement dans les métaux, elle est notablement gênée dans les corps dits mauvais conducteurs; toutefois les corps les plus isolants livrent passage à l'électricité; voilà pourquoi une charge électrique pénètre toujours au delà des limites géométriques des surfaces sur lesquelles elle est répandue, et vers l'intérieur et vers l'extérieur. Nous avons déjà dit ailleurs que dans le verre l'électricité pénètre jusqu'à une certaine profondeur; il en est de même dans les mastics isolants et les résines, chose très-facile à mettre en évidence en traçant à leur surface certaines figures avec une pointe électrisée; les lignes présentent constamment une largeur assez grande. Donc la conductibilité des corps est quelquefois très-faible mais jamais absolument nulle. Dans leurs calculs les mathématiciens peuvent faire abstraction de l'épaisseur de la couche chargée électriquement, mais cela n'est pas permis aux physiciens.

En résultat des faits exposés ci-dessus, nous sommes conduits à concevoir la charge électrique de la manière suivante. Un corps, un métal par exemple, ayant une tension positive présente à sa surface une couche d'éther condensée, tandis que sur un autre chargé négativement la couche superficielle d'éther est dilatée.

Reste à examiner quels effets résultent de la condensation ou de la raréfaction de l'éther. Et d'abord cet éther ne peut être privé de l'expansibilité et de l'agitation qu'il possède dans tous les corps, et qu'il se trouve avoir au moment où il s'est séparé du corps excitateur; par conséquent, il doit agir sur l'éther naturel des corps environnants et de l'espace libre ambiant avec une force expansive proportionnelle à sa nouvelle densité. Dans le cas d'un corps à l'état négatif, on doit considérer l'action comme provenant du milieu naturel ambiant. Pour nous, cette action est comparable à une pression d'origine dynamique, car elle résulte d'une augmentation de la densité de l'éther avec accroissement simultané de mouvement intérieur. Il importe d'insister sur ce point fondamental, et de rappeler que toute tension électrique résulte réellement d'un effet dynamique, chimique, calorifique ou mécanique, dans lequel on peut constamment retrouver la cause d'accumulation et d'accroissement de force vive, que les courants induits nous ont fait connaître. Aussi est-il impossible de concevoir la couche d'éther condensé à la surface des corps électrisés privée de force expansive et dans un repos absolu, comme l'imaginaient les anciens.

Cela posé, l'équilibre de cette couche par rapport aux objets voisins ne dépendra plus seulement des forces de l'éther accumulé sur le corps, mais aussi de celles qu'il développe par son influence dans le milieu environnant. Or, il est deux genres de corps sur lesquels cette action peut s'exercer, les uns permettent à l'éther de se mou-

voir en toute liberté, dans les autres les mouvements de ce fluide sont plus ou moins empêchés; suivant le cas considéré, les effets différeront. Il se passera quelque chose d'analogue à ce que nous voyons arriver lorsque des forces mécaniques sont appliquées à des corps dont la résistance s'oppose à la manifestation de leurs actions spéciales, auquel cas les effets résultants diffèrent suivant qu'elles agissent sur des fluides ou des solides. Dans les fluides, la pression se répand également dans tous les sens; dans les solides, au contraire, diverses forces internes prennent naissance; de telle sorte que l'équilibre s'établit entre les forces *externes* et les forces *internes*, développées par l'action extérieure. Au premier genre d'action se peut comparer l'influence de l'électricité sur un corps conducteur, au second l'influence sur les substances isolantes.

Le mot pression convient parfaitement en cette circonstance, aussi ne sera-t-il pas inutile de présenter une rapide analyse de ses effets[1].

Examinons d'abord comment agit une pression extérieure sur un milieu compressible, mais ne jouissant pas, comme les fluides, de la mobilité dans tous les sens. Tel serait le cas d'une pile de lames très-légèrement compressibles (les diverses couches d'un morceau de bois, par exemple), sur lequel on placerait un poids fort lourd. Le fait est bien connu : il se produit un aplatissement très-prononcé de la première couche, un moindre dans la seconde à cause de la légère condensation survenue dans la première, la diminution de hauteur de la troisième

[1] On croit généralement que le mot pression entraîne l'idée de repos. Il n'en est rien. Un poids placé sur une table exerce une pression, parce que le mouvement moléculaire de sa masse, augmenté du mouvement moléculaire dû à la gravité, est équilibré et contre-balancé par le mouvement moléculaire du point d'appui. Voilà comment il faut concevoir les choses dans le système dynamique moderne.

couche est encore baucoup plus faible, et ainsi l'effet va toujours en diminuant. A la suite de l'application du poids, il se développe dans l'intérieur du corps des réactions qui n'existaient pas auparavant, et bientôt l'effet de la gravité est équilibré par la réaction de ces forces nouvelles. La masse comprimante ne parviendra pas à rompre la première couche et à pénétrer dans son épaisseur, à moins qu'elle ne soit d'un poids supérieur à la résistance du milieu et à la cohésion des molécules du corps, ou qu'elle soit animée d'une telle vitesse qu'en un temps fort court elle exerce une pression de cette même valeur. Lorsque la pression dépasse la réaction moléculaire, le corps cède et il se produit un véritable écoulement tout à fait semblable à celui des liquides, ainsi que l'a reconnu Tresea dans des expériences faites sur la glace, sur divers autres solides et même sur le fer. Les magnifiques travaux de ce savant ont appris que la différence entre les solides et les liquides n'est que du plus au moins. Les liquides sont ceux qui coulent sous la simple pression de leur propre poids; les solides sont ceux qui pour couler doivent être soumis à une pression extérieure dont l'action s'ajoute à celle de la gravité. C'est donc une question de différence de forces, les forces moléculaires d'une part et la gravité de l'autre, qui sont en réaction réciproque, de sorte qu'à la plus forte reste l'avantage. De plus, les études de M. Lainé et d'autres savants sur l'électricité avaient fait connaître qu'effectivement les formes des ondes éthérées ne sont guère différentes de celles qui se forment dans une masse solide à axes d'élasticité différents, bien que la théorie de la vibration de l'éther rentre dans la théorie générale de la vibration des solides.

On est donc parfaitement autorisé à comparer le mode de propagation des pressions dans l'éther à celui qui a lieu dans les solides.

Cette comparaison nous aidera à comprendre comment

les choses se passent dans un milieu isolant confinant à un corps électrisé. Inutile de dire que nous ne regardons pas les isolants comme formés de couches superposées, et que dans leur intérieur l'éther n'est pas à l'état solide et ne présente aucune *cohésion ;* cette dernière proposition serait complétement absurde. L'éther présente quelquefois une immobilité relative dans certaines directions, mais cela tient à ce que la force vive qui lui est appliquée est consommée d'une autre manière, elle produit un mouvement différent, duquel résultent, soit des vibrations transversales, soit des modifications dans les rotations atomiques, et autres effets du même genre. En proposant l'exemple précédent, notre but n'est pas de comparer les forces mises en jeu sous le rapport de leur nature, mais nous y voyons l'image assez fidèle des circonstances spéciales en vertu desquelles, lors de l'influence d'une source électrisée sur un milieu isolant, il se développe au sein de ce dernier des forces particulières qui s'opposent à la libre circulation de l'éther. Par conséquent on comprend que, dans les milieux mauvais conducteurs et dans les métaux, l'éther ne se mettra pas en mouvement avec une égale facilité.

Malgré l'absence de toute espèce de cohésion entre les atomes éthérés, le jeu des forces qui se développent passagèrement en ces conditions simule des effets de cohésion, en *empêchant le mouvement suivant certaines directions et en modifiant la densité*. Les géomètres, lorsqu'ils traitent les problèmes de flexion et de résistance suivant les diverses directions, supposent les molécules animées de forces engendrées par l'action des puissances extérieures, et, sans se préoccuper de leur origine dans chacun des cas particuliers, ils les nomment en général *forces passives*.

Reste à savoir si nous avons le droit d'admettre l'existence de semblables forces dans les corps isolants, et.

dans ce cas, comment la théorie moléculaire de ces corps permet d'en expliquer le développement. On ne peut se refuser à admettre que dans les isolants doivent agir certaines causes qui contrarient les mouvements intérieurs de l'éther, puisque dans ces milieux l'électricité ne jouit pas d'une mobilité aussi grande que dans les métaux. En effet lorsqu'on communique une charge à un des corps dont nous parlons, elle ne se répand pas également dans tous les sens comme le ferait, par exemple, une pression appliquée à un liquide. Pour arriver à se figurer le mode de diffusion d'une charge électrique au sein d'une masse isolante, mieux est d'assimiler cette propagation à celle des pressions dans les solides; et, d'après les observations faites plus haut, une semblable comparaison ne paraîtra pas étrange.

Il est encore une remarque essentielle : l'hypothèse que nous proposons relativement à la constitution spéciale des corps mauvais conducteurs n'est pas uniquement destinée à permettre l'explication des phénomènes électriques, auquel cas elle serait sans valeur; mais les forces dont nous admettons l'existence interviennent dans plusieurs autres phénomènes, notamment dans ceux de la lumière.

L'observation nous démontre que l'éther des corps transparents, malgré son état fluide, est en connexion tellement intime avec la nature pesante qu'il en partage toutes les affections assez rigoureusement pour avoir fait croire pendant longtemps que le mouvement lumineux était propagé par la matière pondérable elle-même. La pression, par exemple, développe dans le verre des variations de densité suivant certaines couches recourbées en forme de conchoïde. Or l'éther de ces mêmes couches présente une densité différente de celle qu'il possède dans le reste du corps : chose facile à mettre en évidence à l'aide de la lumière polarisée. De même que les fibres d'une verge sur laquelle on appuie se tassent et

se courbent en arc, ainsi l'éther intérieur d'un corps soumis à une pression se trouve plus ou moins condensé dans les diverses couches de la matière pondérable ; par conséquent, malgré la fluidité du milieu intérieur, la pression ne se propage pas avec la même intensité dans toutes les directions.

Si une pression mécanique est susceptible de produire dans les corps diaphanes une condensation appréciable de l'éther, pourquoi n'en arriverait-il pas de même à l'agent électrique ? La possibilité de ces compressions intérieures est indéniable, vu l'identité de nature des milieux dans les deux cas, car les substances diaphanes sont isolantes et réciproquement.

Lorsqu'un corps est chargé d'électricité, le milieu environnant se constitue dans une nouvelle condition d'équilibre entre les forces impulsives et compressives de l'éther surajouté ; la charge ne pouvant ici se diffuser, ni se transporter dans le milieu isolant, la densité de ce dernier n'est plus uniforme pour tous les points et décroît avec la distance au corps électrisé lui-même.

Si la quantité de l'éther condensé dans les couches superficielles excède celle qui peut y trouver place, ou si la violence de l'agitation dont il est animé surpasse la cohésion des molécules du corps, il s'ensuivra la rupture de continuité du milieu pondérable, et on aura une décharge pendant laquelle quelque portion de la matière pondérable sera entraînée, puisque celle-ci livre passage plus facilement au mouvement longitudinal, et en même temps l'équilibre se rétablira.

Les considérations développées par nous en considérant le cas d'un corps électrisé par excès conviennent à celui d'un corps électrisé en moins, c'est-à-dire d'un corps négatif; de la part des corps environnants il subira les mêmes influences avec les mêmes phases, car par rapport à lui ils sont dans un état positif. Ainsi tout s'explique

sans qu'il soit nécessaire d'imaginer un fluide négatif, parce que, tout se réduisant à des différences de pression, il est équivalent d'augmenter l'une dans un certain rapport en laissant l'autre à l'état naturel, ou bien de conserver la première à l'état naturel et de diminuer la seconde suivant ce même rapport.

Le frottement et les actions mécaniques lorsqu'elles agissent sur les corps isolés produisent un effet analogue à celui que l'on obtient dans les spirales induites par le courant, à cette différence près que la spirale prend une tension au moment où, soit en commençant, soit en finissant, le courant inducteur trouble les pressions de l'éther surtout par un changement de pression, ou par une sorte de coup de bélier, tandis que dans le cas actuel tout se passe de molécule à molécule. Néanmoins on voit constamment une action dynamique à la base de tout développement d'électricité statique.

Et ce serait une erreur de croire qu'il faille la mise en mouvement de grandes masses d'éther pour obtenir des effets appréciables. Les charges de tension sont toujours peu de chose relativement à la quantité de l'éther nécessaire à la constitution d'un corps. Les recherches faites par Peltier, Faraday et Stokes ne laissent aucun doute à cet égard. D'après Faraday, la somme de force électrique que nécessite la décomposition d'un seul grain d'eau[1] surpasse celle d'un violent orage. Stokes estime que la même quantité d'électricité concentrée sur deux points distants de 1 pied exercerait pour le moins une attraction de plus de 10 tonnes et qui dans certains cas atteindrait une valeur de 42 tonnes[2].

Les analogies entre les pressions de l'éther et les pressions mécaniques se soutiennent même dans les moindres détails. Ainsi nous ferons remarquer la facilité avec

[1] 65 milligr.

[2] Stokes, *Proceeding of the R. Soc.*, vol. VIII, p. 398.

laquelle une pointe pénètre dans un milieu quelconque par pression, et on sait le pouvoir des pointes en électricité. On sait encore qu'une décharge rapide et concentrée sur une pointe rompt les corps et pénètre au travers beaucoup mieux qu'une décharge de même intensité, mais jaillissant d'une plus grande surface. On observe aussi des différences du même genre entre les pressions exercées par un fluide qui s'échappe par un large orifice ou par un ajutage étroit, au travers duquel il prend une vitesse plus grande quoique la pression du réservoir reste la même. Enfin, de même que l'on voit une onde liquide se relever en forme de crête lorsque la profondeur de l'eau diminue, ainsi les décharges électriques sont plus violentes lorsqu'elle éclatent entre des conducteurs étroits, parce que la vitesse et l'agitation du milieu augmentent considérablement.

Ayant admis le principe de l'accumulation d'un fluide expansif sur la surface des corps, la détermination de la distribution de la charge électrique sur un conducteur de forme quelconque devient une simple affaire de calcul. En prenant pour base le principe exposé plus haut, que la pression diminue en raison inverse du carré des distances comptées à partir d'un centre de pression tel qu'il puisse être considéré comme un point, on peut obtenir tous les résultats auxquels sont arrivés les mathématiciens. De là encore résultera la loi que cette tension doit se manifester seulement à la surface du corps.

Pour tenir compte de tous les faits connus, telle est l'idée que nous devons nous faire de la charge électrique et de sa distribution.

Tant qu'il ne s'agit que des mauvais conducteurs, rien ne s'oppose à ce que l'on envisage les phénomènes électriques comme des effets de pression, car dans ces corps les choses se comprennent assez facilement. La difficulté consiste en ce qu'on est forcé d'admettre une semblable ac-

tion dans l'éther libre, c'est-à-dire dans le vide, puisqu'il est isolant et transmet la tension électrique; or il paraît impossible d'imaginer dans un espace vide de matière pondérable des conditions semblables à celles qui se rencontrent dans les solides isolants.

A cette objection nous répondons que les forces susceptibles de produire de tels effets doivent exister, non-seulement à l'intérieur des corps diaphanes, mais encore dans l'éther libre, parce qu'elles sont sans doute les mêmes que celles dont dépend la propagation transversale des vibrations lumineuses. L'existence des vibrations transversales de l'éther est irrécusable : par conséquent, le courant qui est un mouvement longitudinal, ne pourra se propager dans ce fluide. Les vibrations transversales supposent certaines forces intimes qui ne permettent pas aux molécules une égale mobilité dans la direction du choc et dans la direction perpendiculaire : or une telle conception suffit à la rigueur pour expliquer les phénomènes électrostatiques. En effet, une pression qui, en s'exerçant librement sur un corps, déterminerait dans sa masse une vibration longitudinale de l'éther, peut se trouver modifiée de manière à y produire un mouvement transversal; il ne se produira qu'une condensation des couches les plus voisines; son intensité diminuera rapidement avec la distance, et elle n'atteindra pas les parties profondes.

Jusqu'ici on ne connaît pas les vibrations longitudinales dans un espace libre; Fresnel et les physiciens qui lui sont postérieurs se bornent à admettre la possibilité de certaines forces internes par l'action desquelles s'effectuent les vibrations transversales, mais ils laissent tout à fait dans l'ombre les questions de leur origine. Chose remarquable, on objectait à Fresnel que la structure attribuée par lui à l'éther est bien plutôt celle d'un solide que celle d'un fluide; et voici que, contre toute attente, l'étude de l'électricité nous conduit à la même conclusion. Les phéno-

mènes électro-statiques, montrant que l'éther est distribué dans l'espace sous forme de couches dont la densité va en décroissant, nous forcent pour ainsi dire à regarder l'éther comme doué de propriétés analogues à celles des solides; non que ses molécules présentent entre elle une véritable cohésion, mais en raison de forces spéciales qui se développent dans l'éther sous l'influence des pressions extérieures.

Si le lecteur veut se reporter à ce que nous avons dit tout à l'heure, touchant les vibrations lumineuses transversales, il verra que la non transmission du courant dans le vide n'offre aucune difficulté. Les impulsions dans l'éther libre, tant qu'elles ne dépasseront pas un certain degré d'intensité, pourront seulement imprimer aux atomes éthérés un déplacement latéral, et en faire osciller l'axe autour du centre de gravité de chacune d'elles. De cette façon la force vive communiquée au milieu sera complétement absorbée, sans qu'il en résulte de translations longitudinales.

A l'appui de la présente théorie, nous rappellerons que l'électricité est à la fois une des sources lumineuses les plus intenses et une de celles qui donnent la lumière le plus facilement, le moindre frottement produisant l'électricité lumineuse. Mais, dira-t-on peut-être : eu égard aux forces consommées, les effets lumineux obtenus devraient être plus intenses. Réflexion erronée, car, attendu la valeur toujours très-grande de l'équivalent mécanique de toutes les forces moléculaires, la production d'une faible lumière exige l'emploi d'une force considérable, même pour électriser un tant soit peu un corps par les moyens mécaniques ordinaires.

Nous ne rencontrons donc en réalité aucun obstacle sérieux à indiquer une cause explicative des propriétés exceptionnelles de l'éther. En effet, pour rendre compte des diverses particularités des phénomènes, il suffit de sup-

poser que dans l'éther les atomes ne soient pas également disposées à céder dans tous les sens, l'égale mobilité des molécules étant les conditions fondamentales de la propagation uniforme des pressions dans les fluides. Or nous comprendrons pourquoi les atomes éthérés ne présentent pas une mobilité indéfinie si, revenant à une hypothèse déjà mise en avant dans notre théorie de la lumière, nous imaginons l'éther constitué par des atomes en rotation. Dans ce cas un choc ne pourra se faire sentir également suivant toutes les directions, et ses atomes ne se mouveront pas exclusivement dans le sens du choc direct, comme ceux d'un fluide ordinaire ; ensuite, lorsqu'une tranche d'atomes, par la pression de la tranche contiguë, est sollicitée au déplacement, ne pouvant se transporter parallèlement à elle-même, tout se réduira à une compression plus ou moins prononcée de la couche suivante; puis de celle-ci la pression passe à celle qui vient après, et ainsi de suite. Dans le cas d'une pression émanant d'un centre unique, la masse dans laquelle elle se répand augmentant comme le carré de la distance, la condensation diminuera suivant le même rapport ; ce qui est suffisant pour expliquer la loi de décroissance de la force électrique.

Essayons de dissiper les dernières difficultés qui pourraient encore rendre nos idées un peu obscures. A cet effet, imaginons un centre d'agitation au sein d'un milieu formé d'atomes. Deux cas sont à considérer : ou l'on suppose les atomes en repos, ou bien on se les figure en rotation. Si les atomes sont en repos et non élastiques, dans le milieu une portion de la masse se mettra en mouvement, et il ne se produira qu'un déplacement linéaire suivant la direction du choc. Si, au contraire, les atomes sont élastiques, une onde prendra naissance, et tout le mouvement communiqué d'une tranche passera à la suivante. Mais dans le cas où les atomes sont animés de rotation, tout

le mouvement qui leur est communiqué, ne produit pas le déplacement du centre de gravité des atomes ; il est partiellement absorbé par des travaux de divers genres, tels que perturbations des mouvements rotatoires, déplacement des axes de rotation; aussi le transport du centre de gravité de l'atome est très-limité, et lorsqu'il arrive aux parties éloignées il est notablement affaibli.

En effet, chemin faisant, outre les mouvements de réflexion, et tous ceux qui imitent les effets d'élasticité, il faut encore tenir compte des mouvements de conversion (p. 46) et de désorientation ; de ces oscillations singulières des axes analogues aux mouvements dits de nutation et précession par les astronomes. Donc, en même temps que le choc se transmet à distance, une autre partie du mouvement communiqué au milieu, absorbée par les atomes, reste en quelque sorte emmagasinée dans la masse. Cette portion donne naissance à une pression s'exerçant sur les couches successives, avec une intensité d'autant plus grande qu'elles sont plus voisines du centre d'ébranlement. Donc même dans l'éther libre s'exerce une action dont l'intensité décroissant avec la distance se fera sentir plus ou moins loin selon la facilité avec laquelle ces divers mouvements peuvent se propager. Par là on voit les analogies qui rapprochent les phénomènes de l'électricité de ceux du calorique, et comment ces deux ordres de manifestations physiques se relient avec une exactitude inespérée aux phénomènes lumineux. Seulement dans les substances dont les molécules sont extrêmement mobiles, comme les métaux, et dont la limite d'élasticité est très-petite (voir la théorie de la lumière), ces transports se feront comme dans une masse fluide ordinaire et le courant pourra se former.

Résumant les diverses considérations sur lesquelles nous nous sommes longuement étendus, voici en quoi consiste la *charge* d'un corps électrisé. Lorsque par l'action mécanique du frottement, deux surfaces ont leurs molécules

inégalement ébranlées, la couche d'éther interposée ne peut plus rester en équilibre, et, soit à cause des vibrations exagérées qui animent certaines de ces molécules, soit à cause de leurs divers degrés de mobilité, l'éther se distribue de façon à être d'un côté en quantité plus grande que de l'autre. Une fois les deux surfaces séparées, le corps qui reste avec un excès d'éther, en vertu de sa charge plus grande et du mouvement vibratoire plus intense qui l'anime exercera une pression sur la couche contiguë du milieu isolant ambiant. Cette couche, à cause de la faible mobilité des atomes dans le sens longitudinal, éprouve un très-léger déplacement en comprimant la tranche suivante, puis celle-ci réagit sur celle qui vient après, et ainsi de suite : la compression des couches du milieu isolant se transmet donc de proche en proche, en diminuant peu à peu d'intensité. De cette façon, l'éther prend une densité décroissant avec la distance.

CHAPITRE XI

SUITE DES THÉORIES ÉLECTRO-STATIQUES : INDUCTION, ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS : DÉCHARGES ÉLECTRIQUES : ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

Ayant exposé comment nous concevons la tension électrique, il nous reste à examiner les effets qu'elle détermine dans le milieu ambiant, et que l'on appelle d'induction ; puis nous essayerons d'expliquer les attractions et les répulsions électriques.

Les précédentes notions une fois admises, la théorie de l'induction ne présente aucune difficulté sérieuse. Lorsqu'un corps est chargé d'électricité, il change l'équilibre de tout l'espace environnant, en y déterminant un nouveau mode de distribution de l'éther ; cette modification

reconnait pour cause effective la pression exercée par le corps électrisé et la réaction des corps circonvoisins. En nous reportant aux principes exposés tout à l'heure, la couche électrique ayant une épaisseur physique, extrêmement petite il est vrai, mais cependant appréciable, sans abandonner la surface du corps, et, par sa seule force diffusive, elle peut agir sur la couche contiguë de l'éther ambiant et par l'intermédiaire de ce dernier sur un corps placé à distance. Les effets d'une telle action diffèrent suivant que les corps sont mauvais ou bons conducteurs. Dans les premier cas, il s'établit d'une couche à la suivante une condensation d'électricité, dont l'intensité décroît avec la distance comme nous l'avons déjà dit ; et lorsque le corps est parfaitement isolant, le mouvement intérieur est excessivement petit. Pour ce qui regarde le mouvement de transport qui a lieu dans leur masse, la plus petite solution de continuité physiquement mesurable offre une résistance tellement grande qu'elle ne peut être vaincue, mais cela n'empêche pas que la distribution de l'éther du système soit complétement changée. Considérons (fig. 47) un corps chargé électriquement A, placé en face d'un système de couches isolantes faciles à séparer les unes des autres ; tel que serait par exemple un paquet de feuilles de mica bien sèches. Dans ces conditions, l'état neutre de chacune des feuilles est modifié de telle sorte que la quantité naturelle d'éther devient moindre sur la face *n*, tournée vers l'inducteur, et augmente au contraire sur la face opposée P.

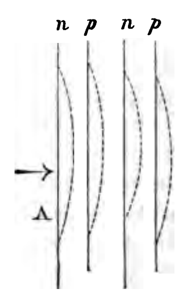


Fig. 47.

En effet, la pression du corps positif se faisant sentir à la couche superficielle *n*, du solide tourné vers l'inducteur, force la quantité naturelle d'éther répandue dans cette tranche à se porter dans la partie la plus éloi-

gnée, c'est-à-dire sur la face opposée p. Supposant toujours qu'aucun échange ne puisse se faire entre le corps inducteur et le corps induit, une action semblable à la précédente s'établit entre la première feuille de mica et et la seconde, et ainsi des autres. L'équilibre se trouve donc rompu dans chacune des feuilles de mica; mais il ne se manifeste rien d'extérieur aussi longtemps qu'elles restent unies et que dure l'induction. La seule face qui montre une tension est la dernière et la plus éloignée. Que l'on vienne à décharger le conducteur A et à séparer les feuilles, la distribution nouvelle de l'éther persiste quelque temps; on a une face positive, l'autre négative, à cause de la très-imparfaite conductibilité de la substance. Y a-t-il eu dans cette expérience action à distance proprement dite. Évidemment non, car entre le corps électrisé A et le corps induit, aussi bien que dans l'intervalle des feuilles existe l'éther, qui a été l'intermédiaire de l'action inductrice de A. Les choses se passent de même dans un corps isolant limité, seulement les changements d'équilibre dans l'éther intérieur deviennent sensible à la superficie du corps sur deux faces diamétralement opposées. Cela explique donc encore comment il se fait que la charge d'électricité statique se montre seulement à la surface des corps, car chaque point intérieur surchargé tend à influer sur celui qui lui est contigu, depuis les parties centrales jusqu'à la surface libre du corps, où cet échange cesse par la solution de continuité.

Le principe fondamental de notre théorie consiste en ce que l'éther d'une surface donnée peut presser et déplacer celui d'une couche voisine. En l'absence de tout transport effectif d'une surface à l'autre, la profondeur à laquelle atteint cette force de pénétration est extrêmement faible, et même très-vraisemblablement l'action se passe dans cette couche superficielle extérieure du solide qui le sépare des corps ambiants. Dans cette couche les mo-

lécules présentent une mobilité fort grande, car il y a discontinuité dans l'action et la réaction. Nous avons ici un phénomène semblable à celui dont il a été parlé en optique, lorsque, étudiant la réflexion des ondes lumineuses à la surface des métaux et des corps opaques, nous avons reconnu qu'elles pénétraient quelque peu à l'intérieur du corps réfléchissant.

Du reste la proposition qui sert de base à toute notre théorie électrique est en quelque sorte démontrable par voie d'expérience; car certains faits signalés par M. Dumoncel nous semblent des arguments très-concluants.

Si l'on maintient à environ 3 ou 4 millimètres l'une de l'autre deux lames de verre revêtues extérieurement chacune d'une lame métallique mise respectivement en rapport avec les deux pôles de l'appareil de Rhumkorff, on aperçoit dans l'obscurité une pluie de feu d'une belle couleur bleue qui s'échange entre les deux surfaces de verre, sans que l'étincelle passe par les bords des lames isolantes. De plus, on distingue entre les lames métalliques et les lames de verre deux raies lumineuses qui indiquent suffisamment que l'effet électrique se manifeste sur toute l'étendue des surfaces interposées entre les deux lames électrisées [1]. En examinant le courant à l'aide d'un appareil très-ingénieux imaginé par Gaugain, on a reconnu qu'il *ne traverse pas* le système mais qu'il change alternativement de sens à partir des plateaux de ce condensateur. La pluie de feu qui jaillit entre les deux feuilles de verre est donc produite par la simple arrivée du courant au niveau de la solution de continuité. Le courant parvenu en ce point y détermine un accroissement de pression qui explique l'apparition du phénomène lumineux, mais le flux électrique ne pouvant vaincre la résistance de la couche

[1] Voy. Dumoncel, *Notice sur la machine d'induction de Rhumkorff*. Paris, 1867. 5e édition, p. 150.

aérienne interpolaire revient sur lui-même et l'équilibre s'effectue à travers les spires de la bobine. Ce fait représente sous une forme sensible et une échelle d'amplification considérable ; ce qui se passe très-vraisemblablement entre les lamelles superposées des corps stratifiés ; et, par suite, il devient prouvé qu'en dehors de tout passage direct, l'électricité condensée à la surface d'un corps peut exercer une pression sur une couche isolante adjacente.

Examinons maintenant ce qui doit arriver à des masses conductrices soumises à l'influence électrique.

Dans le cas où le corps placé dans la sphère d'activité d'une source électrique, est bon conducteur, il se produira dans la masse de l'électricité totale du corps ce qui arrive à une simple molécule, attendu qu'en vertu de la mobilité de l'éther dans ces substances, la pression de la couche isolante contiguë à la surface métallique ébranlera l'éther sur la face tournée vers le conducteur positif, le poussera en avant, et l'accumulera sur la face la plus éloignée de l'inducteur, la pression se faisant sentir moins énergiquement en ce point. Pendant la durée de l'influence il ne sera pas facile de déterminer exactement la véritable condition du conducteur induit, parce que le phénomène se complique des réactions exercées par l'éther environnant; toutefois on peut y arriver en ayant recours à certaines dispositions expérimentales. Par exemple on peut employer un conducteur induit formé de deux parties, faciles à séparer l'une de l'autre avant que l'on décharge l'inducteur; alors on trouve sur la portion de ce conducteur qui était voisine de la source positive, une tension négative, et sur l'autre partie une tension positive. (Wilde.)

Il est clair que si l'inducteur est négatif, le véritable corps inducteur positif sera celui pris à l'état naturel, et les phénomènes se reproduiront les mêmes à la différence des signes qui seront renversés.

Nous n'avons donc nul besoin, comme on le voit d'invo-

quer une action à distance pour expliquer l'induction ; il suffit d'admettre que l'électricité condensée à la surface d'un corps agit par pression sur l'éther de la surface d'un autre corps en contact avec le premier (isolant ou non) sans qu'il y ait transport effectif, mais en vertu de la simple force diffusive propre à l'éther ; de telle sorte que l'excès de la surface électrisée, se trouve compensé par un déficit dans la couche contiguë de la matière environnante. Et on admettra ces idées sans difficulté, si l'on considère que cette rupture d'équilibre se produit toujours lorsqu'au moins une des surfaces en contact est isolante, c'est-à-dire qu'elle appartient à ces substances dans lesquelles un très-faible déplacement de l'éther intérieur seulement est possible. Toute induction cesse s'il a un vrai transport. Alors se produit une décharge, fait d'un tout autre genre.

Aucun des phénomènes d'induction statique ne réclame pour son explication une action à distance, aucune n'exige qu'on admette deux électricités de tensions contraires.

L'électricité induite a dans ces dernières années soulevé de nombreuses controverses. La plupart des physiciens disent qu'il se fait là un développement de *tension :* d'autres soutiennent le contraire. Mais un état électrique sans tension est un contre-sens, puisque c'est la tension, au moins la tension relative, qui constitue tout état électrique. Dès lors, si les corps induits n'ont pas de tension, ils ne sont pas dans un état électrique, ce qui est absurde.

Pour nous, faisant de la charge électrique une rupture d'équilibre de l'électricité naturelle, l'électricité négative ne peut avoir une tension puisqu'elle n'existe pas. Quelques-uns ont cru trouver une objection à l'ancienne théorie dans le fait qu'un conducteur soumis à l'influence d'une source positive devient négatif, après la mise en communication avec le sol de l'extrémité la plus rapprochée de l'inducteur.

Il semble qu'alors l'électricité positive doive rencontrer nécessairement l'électricité opposée avant de se décharger dans le réservoir commun, chose impossible. Cette difficulté est aisée à résoudre. Soit (fig. 48) le cylindre CD isolé et placé en face de la sphère P, il est positif en D et négatif en C; mis en relation avec le sol à l'aide d'un fil conducteur a, il devient aussitôt entièrement négatif. Un tel résultat n'entraîne pas nécessairement la conclusion précitée. En effet, la communication une fois établie, le cylindre ne doit plus être considéré comme le corps de dimensions finies que nous avions auparavant; il devient un corps d'étendue immense dont fait partie le globe

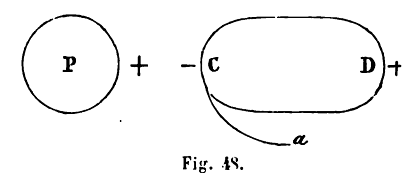


Fig. 48.

terrestre, avec lequel il est en contact médiat et dont il est pour ainsi dire une extrémité. Dans un pareil système la charge négative doit se distribuer sur la partie la plus voisine de la force inductrice, c'est-à-dire sur le cylindre et le fil conducteur. Et il n'y a aucune impossibilité physique à ce que pendant l'établissement du nouvel état d'équilibre, la quantité d'éther primitivement condensée dans la partie éloignée s'échappe dans la terre en passant par l'extrémité C. Il faut un certain intervalle de temps à ce mouvement pour s'effectuer, et peut-être ne serait-il pas impossible de le reconnaître avec un galvanomètre fort délicat.

Quant aux expériences de Melloni et de tous ceux qui ont prétendu prouver l'absence de tension dans les corps induits en mettant des plaques métalliques entre les petits

pendules attachés au cylindre soumis à l'influence ou en employant d'autres dispositions analogues, quels que soient les résultats obtenus par ces expérimentateurs, ils ne sont pas concluants; car les pièces ajoutées au cylindre constituent en réalité autant de nouveaux systèmes soumis à l'influence. Dans de semblables conditions, les expériences s'éloignent beaucoup des cas théoriques que l'on se propose de vérifier; il n'y a donc rien d'étonnant à ce que les résultats obtenus ne concordent pas avec les théories admises par les expérimentateurs, et leur discussion ne doit pas nous arrêter.

Arrivons enfin aux attractions et aux répulsions, dont la théorie a fait imaginer tant de forces diverses. A notre tour, nous proposons une explication dont voici l'idée fondamentale : toutes les fois que l'éther se trouve en excès ou en défaut dans un corps, l'équilibre tend à se rétablir par tous les moyens possibles; et à ce moment la force vive de l'éther peut se communiquer à la matière pondérable, laquelle se mettra en mouvement si elle est suffisamment mobile, d'où ces mouvements des corps légers, attractions ou répulsions. La cause déterminante de ces mouvements est l'agitation de l'éther condensé, qui produit encore là condition spéciale de la matière électrisée nommée ordinairement état répulsif. Quelques-uns expliquent cette condition par une atténuation de la matière pondérable superficielle. Nous, au contraire, nous l'attribuons à un accroissement de la charge d'éther. Cela n'exclut pas le mouvement moléculaire; car, dans cet état, la matière présente un excès de mouvement moléculaire qui du corps pondérable se transmet à l'espace ambiant plein ou vide. Telle est la cause initiale de la force diffusive que nous avons dit produire l'induction, et à l'action de laquelle on peut rapporter encore les attractions et les répulsions; comme nous allons le faire voir tout à l'heure.

On ne manquera pas de nous objecter que si l'électricité de tension est un mouvement, sa déperdition devrait être immédiate, de sorte qu'un corps ne pourrait jamais conserver une charge électrique. Les vues théoriques développées ci-dessus nous fournissent une réponse facile à ces questions. La dispersion du mouvement suppose la possibilité d'une communication de mouvement s'effectuant à une certaine distance dans le sens longitudinal; si le corps siége de ce mouvement est de telle nature qu'il ne puisse le propager longitudinalement, le mouvement se localisera tout entier sur la surface où il s'est développé d'abord.

Faisons bien remarquer à ce propos que pour nous l'électricité ne se réduit pas à une simple exaltation de la vibration moléculaire, mais qu'il y a encore une variation de densité ou de masse de l'éther, qui tantôt éprouve une condensation, tantôt une raréfaction.

Abordons maintenant la théorie des attractions et des répulsions. Dans les substances isolantes, avons-nous dit plus haut, l'éther n'est pas libre de céder à tous les mouvements, par conséquent s'il exerce une pression supérieure à celle que comporte la cohésion ou le poids du corps sur lequel il est condensé, il en résulte une force. Cette force devant nécessairement être équilibrée, cela pourra se faire par le transport du corps à la surface duquel l'éther est adhérent, dans le cas où il présente une mobilité suffisante. Considérant l'action résultante de la tendance expansive de l'éther, lorsqu'elle agit comme pression, on reconnaît que nécessairement :

1° Deux corps électrisés positivement doivent s'éloigner l'un de l'autre.

Soient (fig. 49) deux sphères égales chargées par excès; chacune en vertu de sa force répulsive exercera une pression sur l'éther circonvoisin; et dans l'éther occupant l'intervalle AB la pression sera la somme des deux,

tandis que dans l'espace extérieur MN la pression est

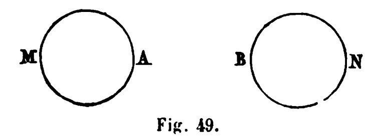


Fig. 49.

simple et peut, du reste, se répandre dans le milieu non condensé. Par conséquent, en vertu des lois d'équilibre dynamique, si les sphères présentent une suffisante mobilité, leur distance augmentera nécessairement. En effet, le rétablissement de l'équilibre ne pourrait se faire que de deux manières : ou l'éther du milieu AB se retire de lui-même vers les parties éloignées M et N, ou la distance des deux sphères A et B augmente. Le premier cas se rencontre quelquefois, mais seulement lorsque les corps en présence sont conducteurs et inégaux (alors il y a déplacement d'éther, changement d'action qui donne lieu à l'attraction). Négligeons cette circonstance particulière pour le moment, comme il est impossible d'admettre le déplacement de l'éther dans le milieu environnant, parce qu'en sa qualité d'isolant il ne permet pas à l'éther de se transporter d'un point à un autre; nous arrivons forcément à dire que les deux sphères électrisées doivent s'éloigner. A cette répulsion contribuera l'action des parties extérieures M et N; car l'éther étant condensé aux environs des balles fait effort pour se répandre dans les couches éloignées.

2° Quand les deux corps en présence sont électrisés, l'un positivement, l'autre négativement, les conditions d'équilibre exigent leur rapprochement. De cette façon seulement se trouveront compensées les différences de pression qui sont de signe contraire, non-seulement dans l'intervalle des deux sphères, mais aussi dans tout l'es-

pace environnant ; car l'influence par excès de M s'étend au delà de N et réciproquement. Donc l'équilibre ne pourra s'établir que si les deux corps se rapprochent d'un même point autant que possible.

3° Dans l'hypothèse de deux corps négatifs, il est nécessaire d'examiner l'action du milieu étendu entre eux et au delà d'eux. Les sphères étant électrisées en moins, dans l'intervalle AB, il y a une véritable raréfaction ; or de cette raréfaction ne peut résulter ici, comme dans un fluide ordinaire, un effet d'aspiration chassant les corps l'un contre l'autre, car le milieu, en raison de son pouvoir isolant ne permet pas à l'éther d'affluer des points éloignés et d'agir par voie de communication directe. Ainsi le milieu qui sépare les deux sphères, éprouvant à ce moment une raréfaction, est incapable de fournir la quantité nécessaire au rétablissement de l'équilibre des deux corps. Par contre, dans les parties opposées M et N se trouvent les conditions du second cas, c'est-à-dire l'action de corps *relativement* positifs qui agissent pour écarter les deux sphères l'une de l'autre. Je dis relativement positif, car les objets environnants et l'espace lui-même à l'état naturel jouent le rôle d'un corps positif mis en présence d'un autre négatif et mobile. Ainsi l'éloignement réciproque de deux sphères électrisées en moins s'explique sans qu'il soit nécessaire d'admettre une vraie force répulsive dans la matière.

Cette théorie des attractions et des répulsions électriques repose donc sur le seul principe que le mouvement relatif de la matière pesante se fait de manière à ramener les pressions à l'égalité ; le corps négatif se portera sur le positif, s'il est le plus mobile, et *vice versa* dans le cas contraire.

Enfin, un quatrième cas se présente, celui d'un corps naturel placé en regard d'une source électrique ; mais on

retombe alors dans un des cas précédents, car nous avons reconnu en étudiant l'induction que dans ces conditions tout corps mobile neutre, avant d'être attiré est par influence électrisé contrairement à l'inducteur.

Les attractions et les répulsions s'exercent aussi dans le vide, mais nous ignorons d'abord comment elles sont alors modifiées quant à leur degré d'intensité, ensuite jusqu'à quelle limite le vide lui-même est isolant et empêche la décharge. Il semble que les phénomènes d'induction et, en général, tous ceux d'origine électrique, se manifestent d'autant plus facilement que la résistance du milieu est moindre. Par exemple, les substances gazeuses, qui dans leur état ordinaire sont isolántes lorsqu'elles sont raréfiées, deviennent conductrices, mais en même temps elles sont lumineuses. Il reste encore beaucoup à savoir sur ces phénomènes, et, sans nul doute, les résultats fournis par leur étude approfondie jetteront une grande lumière sur nos idées théoriques. Disons cependant que, d'après les expériences de M. Gaugain, l'induction ne se fait pas seulement par l'air, mais que l'éther y joue un certain rôle, puisque la densité de l'air étant réduite à $\frac{1}{14}$, la force d'induction ne change pas.

De l'exposé précédent, il suit que les phénomènes d'attraction présentés par les corps négatifs ne diffèrent réellement pas de ceux qui nous sont offerts par les corps positifs; mais cela n'entraîne pas une parfaite identité de tous les autres phénomènes correspondant aux deux états électriques. Selon que l'électricité sort d'un conducteur ou y pénètre, la modification du milieu ambiant n'est pas la même. Ne voyons-nous pas en hydrodynamique, dans les liquides, la forme d'un jet liquide à la sortie d'un vase différer de celle du tourbillon d'entrée. Depuis longtemps les observateurs ont noté les diverses formes de la décharge lumineuse, qui, lorsqu'elle est positive, présente l'apparence d'une aigrette, et celle d'une petite étoile,

quand elle est négative; mais elles ont été rendues plus évidentes par les expériences faites dans les gaz raréfiés.

On se tromperait beaucoup si l'on voulait tirer des phénomènes lumineux caractérisant chacune des pointes terminales d'une batterie électrique quelques conclusions relatives aux manifestations calorifiques à ces mêmes pôles. En effet, la lumière consiste dans une violente agitation d'un petit nombre de particules et la température dans une vibration générale de la masse; les deux phénomènes ne sont donc pas de même ordre, bien que les deux produits mV^2 et Mv^2 soient égaux, ajoutons encore que la matière des deux pôles est soumise à un travail différent, puisque, d'un côté, il y a disgrégation de particules pesantes et de l'autre dépôt : conséquemment la température en ces deux points doit être différente. Dans certaines expériences le pôle négatif peut être bien le plus chaud, mais alors il n'est ni le plus lumineux, ni celui duquel jaillit la décharge.

Quand la densité de l'éther, et avec elle l'agitation des molécules matérielles disséminées dans sa masse, acquiert une intensité suffisante pour excéder les limites de la cohésion qui maintient les particules pesantes sur la surface des corps, celles-ci se détachent et la charge s'équilibre en transportant les molécules elles-mêmes, et en les animant d'une vibration tellement violente, qu'elles arrivent à l'incandescence. Évidemment la décharge est provoquée par la tension de l'éther, mais elle est grandement favorisée par la matière pesante qui se transporte avec ce fluide pour rétablir l'équilibre. Ainsi la décharge dite *disruptive* ne diffère pas essentiellement du mouvement de translation d'une balle de sureau en présence d'un conducteur électrisé; seulement pour détacher d'un corps quelques parcelles de la couche superficielle, il faut une force de beaucoup supérieure à celle qui met en

mouvement une balle de sureau, car, dans ce dernier cas, la seule résistance à surmonter est l'action de la gravité. En résumé, la théorie des mouvements attractifs et répulsifs, qui est incompréhensible alors que l'on repousse l'intervention de la matière impondérable, devient aisée, au contraire, dès l'instant où l'on admet l'existence d'un éther, de sorte que notre hypothèse embrasse l'ensemble des phénomènes physiques connus et établit entre eux de remarquables relations.

Durant les décharges électriques, un véritable travail est accompli par la force vive de l'électricité accumulée sur les corps en présence. La nature du travail varie beaucoup ; tantôt c'est le simple transport des molécules d'un corps isolant arrachées et entraînées pendant le rétablissement de l'équilibre; tantôt c'est une élévation de température ou une volatilisation des fils conducteurs; d'autres fois c'est une décomposition chimique, ou bien encore une induction magnétique. Les puissantes décharges (celle de la foudre spécialement) produisent tous ces effets simultanément, et, par suite, la mesure de leur intensité est fort difficile. Cependant, dans certains cas les effets du travail sont manifestes. Ainsi, les expériences de Riess ont appris que la décharge d'une même batterie produit un effet thermométrique beaucoup plus prononcé lorsqu'elle jaillit sur le thermoscope à travers une simple couche d'air, que lorsqu'elle est forcée de traverser un isolant, une feuille de verre ou de mica par exemple. Tandis que dans le premier cas l'élévation de température était de 15°,9, dans le second elle atteignait seulement 6°,8 [1]. Lorsque le corps isolant interposé est le verre ou le mica et non l'air atmosphérique, le travail de

[1] *Archives des sciences naturelles*, 1868, t. I, 296. Pour de plus amples renseignements, lire le Mémoire de Clausius. Pogendorff. Ann. t. LXXXVI, p. 337, et t. LXXXVII, p. 415.

perforation devenant beaucoup plus grand, l'autre partie de la force vive, qui dans l'arc de décharge se traduit sous forme de chaleur, diminue d'autant.

Au moment des décharges de notables quantités de matières sont volatilisées et transportées, et on peut comparer la transmission des particules pesantes d'un pôle à l'autre à l'entraînement des cendres et du noir de fumée dans le tuyau d'une cheminée, par le courant d'air alimentant le foyer. Le transport de la matière qui accompagne les étincelles électriques s'effectue par une sorte de vibration, comme le montrent les figures d'étincelles obtenues par Feddersen (voyez plus haut) et aussi les faits observés par de la Rive, qui, faisant passer la décharge dans des gaz raréfiés et concentrant son action sur des fils minces, a vu les globules fondus et les parties d'une plaque dépolies par la volatilisation former une série d'anneaux concentriques.

Il ne faut pas confondre le mouvement de la matière pesante que l'on observe dans les décharges avec la cause qui lui donne naissance. Celle-ci est généralement la force vive de l'éther accumulé et excité à la surface du corps par des actions mécaniques ou d'autres semblables. Au moment où elle se met en équilibre, elle accomplit divers travaux, entre autres celui de détacher et de transporter les molécules des corps qu'elle rencontre et de ceux sur lesquels elle est accumulée. Cette pression, comme toutes les autres, prend naissance d'un mouvement qui est empêché. Dans ces conditions, les molécules en mouvement vibrent énergiquement pour échapper aux obstacles qui les gênent et qui s'opposent à leur déplacement. Une pression n'est pas un mouvement purement virtuel, c'est un mouvement réel, mais d'une amplitude fort restreinte. Voyez à ce sujet ce qui a été dit en traitant du calorique.

On nous objectera peut-être que nous ramenons la

science à son berceau en fondant notre théorie sur les pressions électriques, conception déclarée inacceptable par les géomètres qui ont traité ce sujet. Mais l'objection ne porte pas. D'abord l'idée de pression se déduit naturellement de celle de courant, admettre l'une c'est admettre l'autre. De plus, les premiers physiciens qui ont parlé des pressions électriques n'ont signalé ni surtout prouvé l'existence de relations entre ces pressions et la constitution de la matière. Aujourd'hui il n'en est pas de même. On comparait habituellement cette pression à celle qu'une masse fluide exerce dous tous les sens avec une égale intensité; on en faisait un effet statique, nous avons montré qu'au contraire cette pression est un phénomène dynamique; elle tend réellement à se répandre dans tous les sens, mais elle ne s'exerce pas avec une égale intensité dans toutes les directions, parce que l'éther ne peut au sein des isolants prendre un mouvement de translation longitudinale indéfini. L'impossibilité des mouvements longitudinaux de l'éther est la cause première de ces forces qui régissent l'équilibre interne des corps diaphanes; forces dont l'existence nous a été revélée par l'optique. Dans les théories proposées par les anciens partisans des pressions électriques, cette remarquable relation n'a jamais été signalée. Du reste, quand même nous ressusciterions un système abandonné s'il est conforme à la nature, le blâme ne peut retomber sur nous, mais sur ceux qui délaissèrent une hypothèse juste pour courir après de vaines ombres, et se perdre dans le dédale des forces abstraites, pures fictions de l'imagination.

Toutefois il est juste de remarquer que les géomètres échappent à toutes ces critiques. Ils ont pris pour base de leurs calculs le fait que deux corps infiniment petits (c'est-à-dire deux éléments différentiels), *chargés de cette force qui les rend électriques de même nom*

se repoussent, et s'attirent au contraire lorsqu'ils ont des états électriques de nom contraire. Ce principe fondamental une fois admis, le calcul en dégage diverses conséquences; mais il reste impuissant à démontrer l'exactitude du premier fait, les conclusions ne pouvant avoir que la force des prémisses, quand les déductions sont légitimes; et tel est notre cas. Cependant quelques mathématiciens ont voulu aller plus loin et déterminer la nature de la cause première des phénomènes. Nous avons vu quelle prodigieuse quantité de forces il leur a fallu imaginer à cet objet. Et alors se présente l'éternelle question *en quoi consistent ces forces.* Quelle idée physique pouvons-nous nous en former? à cette question personne n'a répondu jusqu'ici. Ces difficultés sont sérieuses, mais notre hypothèse permet de les éviter, car elle suffit à tout, et toute supposition secondaire devient inutile, une fois que l'on a admis l'éther comme principe constitutif des corps.

Le jour où il sera démontré que, dans l'explication des phénoménes électriques, le rôle attribué à l'éther est une inutile superfétation et que les propriétés de la matière pondérable permettent d'expliquer les moindres détails, tout en conservant des rapports très-étroits entre les faits de cet ordre et les autres branches de la physique, ce jour-là, nous éprouverons une vive satisfaction. Notre seul désir est d'arriver à la vérité et non de défendre une théorie; quand même elle serait nôtre pour le fond et pour la forme, à plus forte raison si, comme dans le cas actuel, elle ne fait que reproduire certaines idées dont on peut retrouver la trace dans les ouvrages des physiciens, qui, en dehors de leurs recherches expérimentales, se livrèrent aux spéculations de la philosophie naturelle. Une telle démonstration, si tant est qu'on parvienne à l'établir, couronnerait tous nos efforts, car son résultat immédiat serait de faire disparaître

de la physique les forces abstraites et toutes les causes d'origine occulte.

Une puissante source d'électricité statique dont nous n'avons point parlé jusqu'ici, c'est l'électricité atmosphérique; aussi ne pouvons-nous terminer ce chapitre sans en dire quelques mots. Elle a été l'objet de travaux très-nombreux, et cependant nous ne possédons encore qu'un bien petit nombre de faits certains. L'atmosphère par un ciel serein est constamment chargée d'électricité positive, elle devient négative au moment et à l'approche des orages; ce qui évidemment est un effet d'influence de la part des masses positives. D'où vient cette électricité? Quelques savants l'expliquent en disant que l'espace est électrisé positivement et la terre négativement. D'autres, et c'est le plus grand nombre, regardent l'évaporation comme la source de l'électricité atmosphérique. Cette théorie a été vivement attaquée, à tort suivant nous. Nulle action calorifique ne peut avoir lieu dans la matière pondérable sans déterminer une rupture d'équilibre et un mouvement de l'éther, et par suite sans être accompagnée d'une manifestation électrique. Aussi sommes-nous portés à croire que la vapeur pendant son développement soustrait de l'électricité aux corps terrestres en même temps qu'elle leur emprunte du calorique latent; cette électricité ne devient pas sensible tant que la vapeur garde l'état élastique sous lequel elle s'est élevée du sol; mais, lors de sa condensation, elle dégage à la fois électricité et calorique, et l'on explique ainsi la charge électrique que l'on observe au moment de la condensation de la vapeur. Une telle conception est rationnelle; ne voyons-nous pas la tension électrique augmenter à mesure que diminue la surface du corps électrisé, et le dégagement de l'électricité dans ce cas n'a-t-il pas pour homologue celui de la chaleur latente d'une vapeur qui devient sensible lorsque celle-ci se condense?

Cette théorie est grandement fortifiée par le fait certain que les variations de l'électricité atmosphérique sont parallèles à celles éprouvées par la vapeur d'eau répandue dans l'air, et ces variations hygrométriques ne sont pas seulement ces perturbations profondes causées par les précipitations abondantes qui engendrent les orages et la grêle auxquels cas invariablement une condensation rapide de vapeur s'accompagne de violentes décharges électriques, mais encore ces fluctuations plus calmes qui se renouvellent chaque jour. Ainsi la tension électrique de l'air augmente le soir quand la rosée commence à se déposer, et augmente d'autant plus que le dépôt est plus abondant. La tension est énorme en été lorsque la condensation se fait en masses très-grandes au milieu d'un air chaud et isolant, car la déperdition est alors très-faible, d'où la fréquence et la violence des orages à cette époque de l'année. Par contre, dans la saison pluvieuse, la condensation s'opérant au sein d'une atmosphère humide touchant au sol, la tension se neutralise au fur et à mesure qu'elle se développe; aussi les orages sont-ils rares, ou viennent tout au plus au commencement des bourrasques et des pluies très-abondantes.

Plusieurs savants n'acceptent pas cette théorie extrêmement simple, et continuent à regarder le problème de l'électricité atmosphérique comme non résolu, car ils refusent à l'évaporation la faculté de développer l'électricité. Ne cherchons pas en ce moment à décider si nous devons accorder toute confiance aux expériences faites dans le but de prouver que l'évaporation est par elle-même une source d'électricité; peut-être faut-il aussi faire jouer un rôle aux actions chimiques concomittantes. Mais ne semble-t-il pas difficile d'admettre qu'un changement d'état, tel que le passage d'un liquide à l'état de vapeur puisse s'accomplir sans déterminer un changement dans l'équilibre de

l'éther. D'ailleurs les expériences contradictoires faites en opérant dans des creusets de platine rougis à blanc sont peu ou point concluantes; parce que le liquide projeté dans ces creusets passant à l'état sphéroïdal et la vapeur qui s'en sépare étant sèche, il peut parfaitement arriver que la communication électrique ne puisse s'établir entre le liquide et le vase.

Si, abordant la question indirectement, nous l'envisageons à un point de vue purement théorique, elle nous semble se décider dans le sens que nous indiquons.

En effet, par l'examen attentif des diverses circonstances de l'évaporation on est amené à se demander si durant la condensation, une partie de la force vive calorifique ne se transformerait pas en mouvement intérieur de la masse aqueuse, puis celui-ci se distribuant inégalement autour des particules de vapeur et des goutelettes liquides, il en résulterait une accumulation de mouvement moléculaire dans les couches superficielles? Assurément la formation de la moindre parcelle de cette poussière d'eau dont les nuages et les brouillards sont constitués, nécessite un nombre immense de molécules de vapeur; et la distribution de l'éther dans ces molécules doit être bien différente suivant qu'elles sont libres ou réunies; il n'y aurait donc aucune absurdité à penser que par ce seul fait la molécule d'eau puisse acquérir un état éthéré positif, relativement à celui qu'elle avait auparavant.

Les explications précédentes et l'hypothèse de l'éther n'ont aucun rapport nécessaire. En effet, supposons que le milieu éthéré n'existe pas, rien ne nous empêche d'admettre que cette force vive de la matière pesante qui selon toute école constitue le calorique puisse se transformer dans la force vive d'expansion et de raréfaction qui constitue l'électricité. La conversion de l'électricité en calorique et du calorique en électricité n'est pas une absurdité dès que ces agents ne

sont pas des fluides, mais de simples modes de mouvement, quelle que soit du reste la matière en mouvement qu'elle soit pondérable ou impondérable. Donc regarder l'électricité atmosphérique comme de la chaleur transformée, c'est en donner une explication rationnelle, et conforme aux idées que nous nous faisons aujourd'hui des forces de la nature : et si les résultats fournis par l'observation laissent encore à désirer, le principe théorique n'a rien à redouter des incertitudes de l'expérience.

La distribution de l'électricité dans l'atmosphère est telle que tout conducteur élevé à une certaine hauteur accuse un état positif, relativement à celui qu'il présentait un peu plus bas, et devient négatif en descendant vers le sol. On s'explique ainsi pourquoi la pluie est ordinairement négative. Quelques physiciens ont déduit de là que le globe terrestre est négatif de sa nature, tandis que toute l'atmosphère et les espaces célestes sont positifs. Une pareille conclusion nous semble peu rigoureuse. En effet, tout s'explique en admettant que les vapeurs répandues dans l'air lui communiquent une charge positive jusqu'à une certaine hauteur qui nous est inconnue. Quant à l'espace interplanétaire, il n'est nullement prouvé qu'il soit électrisé ; enfin l'état négatif de la terre pourrait bien résulter de l'induction exercée par la charge atmosphérique. Nous ne disons rien des phénomènes produits par les coups de foudre, car ils ne font que reproduire dans une proportion gigantesque les effets de nos batteries, et ceux-ci ont été étudiés soigneusement dans ce chapitre.

CHAPITRE XII

DES ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS ÉLECTRO-DYNAMIQUES. DES ACTIONS MAGNÉTIQUES.

Le magnétisme a vivement excité la curiosité des observateurs. On le regardait comme un des mystères les plus impénétrables de la nature, et l'on croyait la force dont il est la manifestation sans analogie avec les autres forces connues. Lorsque le génie expérimental eut banni des écoles les discussions inutiles, et que la philosophie naturelle s'engagea dans la voie de l'expérience et de l'observation, le magnétisme attira l'attention des physiciens d'une façon toute spéciale. La science s'enrichit d'observations nouvelles, les lois des phénomènes furent découvertes, mais leur cause première resta toujours inconnue dans son essence. Jusqu'à ces derniers temps les physiciens rapprochaient le magnétisme de l'électricité, bien plutôt parce qu'ils avaient remarqué certaines analogies dans les apparences des deux ordres de phénomènes, que parce qu'ils étaient parvenus à les rattacher à une même cause. Il était réservé à notre siècle de faire connaître une nouvelle modalité de l'électricité, grâce à laquelle la connexion des deux agents se trouve nettement indiquée. Dès lors, la réduction de l'électricité et du magnétisme à un principe unique ne fut plus une simple hypothèse, mais une conséquence rigoureuse de l'analyse mathématique. Ainsi les actions magnétiques sont devenues un cas particulier des actions électro-dynamiques et nous ne devons pas séparer leur étude.

1° Ce qui frappe à première vue dans les phénomènes produits par les aimants c'est l'exclusivité de la vertu magnétique. Elle est propre à un petit nombre de substances

seulement et même à proprement dire à une seule, le fer. Depuis la découverte d'Ampère, ce prétendu caractère spécifique n'a plus aucune valeur, on sait que les substances les plus diverses deviennent des aimants aussitôt que l'on détermine autour de leur masse une circulation convenable d'électricité.

2° Une seconde particularité semble séparer d'une manière absolue le magnétisme de l'électricité. L'aimant exerce son action à travers toutes les substances indistinctement, ce qui n'a pas lieu pour l'électricité statique ni pour les radiations; sous ce rapport, l'action magnétique se rapproche de celle de la gravité. Les seules substances qui offrent une résistance à la force magnétique sont celles susceptibles d'être aimantées, et les corps conducteurs dans l'intérieur desquels le mouvement fait naître des courants induits. Ainsi la transmissibilité du magnétisme n'est pas exactement semblable à celle de la gravité, puisque certaines substances résistent à l'influence des aimants tandis qu'il n'en est jamais ainsi pour l'attraction universelle.

3° Les actions magnétiques et les forces électro-dynamiques présentent encore une propriété qui leur est spéciale, c'est la polarité — autrement dit *la faculté d'exercer des actions égales et opposées aux deux extrémités d'une ligne*. Ce mot polarité est d'un emploi fréquent en physique, il revient à l'occasion des phénomènes les plus divers, et malheureusement on ne l'emploie pas toujours pour indiquer une modification constamment la même. Ainsi, dans la polarisation de la lumière, tout se réduit à *une direction des vibrations dans un même plan*. Certains chimistes nomment polarité l'état particulier dans lequel se trouve un liquide décomposé par voie électrolytique. Suivant eux, dans une dissolution aqueuse quelconque traversée par un courant, l'hydrogène de toutes les molécules se trouveraient électrisé en plus, et l'oxygène électrisé en

moins, le passage du courant se faisant par une série de décomposition successives. Bizio (voy. p. 472) entend par polarité une orientation matérielle des centres de gravité produite par le courant, laquelle serait essentiellement différente de la polarité magnétique. Enfin on parle souvent de la polarité électro-statique, telle que celle des cristaux thermo-électriques ; cette polarité se distingue de celle des aimants en ce que la charge des premiers réside à leur surface, tandis que dans les seconds elle se trouve à l'intérieur de chacune des molécules ; en effet, tandis que les cristaux électrisés mis en contact avec un corps conducteur se déchargent complétement, dans les mêmes conditions les aimants ne perdent rien de leur force. Dans les deux cas les phénomènes sont moléculaires, et lorsqu'on brise un aimant, les fragments conservent les pôles dans la direction de ceux que présentait la masse entière avant sa division. Par exemple, si on casse l'extrémité d'un barreau aimanté rectangulaire AB (fig. 50) de manière à en détacher un morceau *mn* de même base que le barreau, mais dont la moindre dimension corresponde à la longueur de la barre ; on obtient ainsi un nouvel aimant dont les pôles sont disposés dans le sens de la moindre dimension CB. A la vérité, cette polarité se dé-

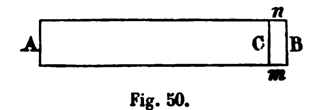


Fig. 50.

truit avec le temps, mais enfin elle dure assez longtemps. Enfin, quelques physiciens ont désigné sous le nom de polarité l'état des conducteurs d'une machine électrique à disque, mais c'est donner à ce mot une extension abusive.

Grove compare la polarité magnétique à la direction

que prennent un certain nombre de girouettes, lorsque le vent venant à souffler d'un point unique de l'espace les dispose toutes parallèlement les unes aux autres; puis il ajoute que si le vent vient à cesser elles reprendront leurs positions primitives ou conserveront leur orientation suivant qu'elles sont ou non en équilibre indifférent. Mais cette comparaison qui rappelle assez bien les idées de Bizio sur la polarité, n'explique en rien l'action que ces girouettes exerceront sur leurs voisines pour les disposer parallèlement à leur propre direction, à moins que l'on n'imagine en chacune d'elles, deux centres d'action opérant à distance et dont les signes soient contraires. C'est là précisément l'idée fondamentale de l'ancienne théorie d'après laquelle chaque molécule possédait du fluide austral et du fluide boréal. La découverte d'Œrsted le conduisit, comme nous l'avons dit, à attribuer aux conducteurs une polarité transversale, mais les travaux analytiques d'Ampère et les phénomènes de rotations électro-magnétiques ont démontré le peu de fondement d'une semblable doctrine.

« L'impossibilité, dit Ampère, d'imiter avec des aimants seulement, de quelque manière qu'on les dispose, le mouvement continu, toujours dans le même sens, qu'offrent les circuits voltaïques non fermés, soit sous l'influence d'un circuit fermé, soit sous celle d'un aimant ou du globe de la terre; mouvement qu'on ne peut produire avec les circuits fermés, les seuls que ma théorie assimile aux aimants; cette impossibilité, dis-je, prouve directement ce que je cherchais à établir dans cette discussion sur des preuves complètes et indirectes, savoir : que quoiqu'on puisse rendre raison de tous les phénomènes que présentent les aimants, en y admettant des courants transversaux formant autour de leurs particules des courants fermés, on ne peut pas expliquer tous ceux qu'offrent les fils conducteurs en y admettant une aimantation transversale, et

qu'ainsi l'hypothèse de ces physiciens ne saurait être admise[1].

Ampère s'occupe tout d'abord de savoir si les courants moléculaires des aimants se créent de toutes pièces dans les substances magnétiques, pendant l'aimantation, ou bien si la cause qui aimante ne fait que déterminer une circulation de courants préexistant dans les métaux à l'état naturel[2].

Il se décide en faveur de la dernière opinion, à cause de plusieurs raisons et en particulier de cette considération que l'aimantation ne saurait changer la température du morceau de fer qui l'éprouve, d'où il résulte que les circuits magnétiques ne peuvent être constitués autrement que par les circulations intérieures qui dans tous les corps accompagnent l'existence de la chaleur. Mais il faut ici distinguer les groupes moléculaires des simples molécules, parce que le vrai magnétisme polaire est propre seulement aux substances solides; et bien qu'une certaine forme de magnétisme ait été découverte dans quelques liquides et dans un petit nombre de gaz, une polarité permanente n'y a été jamais démontrée, et les effets obtenus paraissent dépendre plutôt d'une propriété contraire, le diamagnétisme, dont nous allons parler un peu plus loin, que du véritable magnétisme propre aux masses de fer. Un fait certain, c'est que les substances magnétiques par excellence perdent, autant qu'on peut le reconnaître par les moyens ordinaires, leur vertu par la fusion. Matteucci l'a démontré en expérimentant sur le fer; d'où l'on croit que la qualité magnétique résulte surtout de l'état d'agrégation des molécules constitutives du solide.

L'hypothèse d'Ampère assimilant les propriétes des aimants à celles des courants, les premières seront expli-

[1] Ampère, *Recueil d'observations électro-dynamiques*, p. 255.
[2] *Ibid.*, p. 181.

quées dès que nous aurons trouvé une interprétation satisfaisante des secondes. Or, pour faire comprendre les phénomènes électro-dynamiques, il suffit de donner la raison physique de la formule établie par Ampère, car elle renferme en principe tous les cas imaginables : de sorte qu'ayant trouvé le principe physique sur lequel repose cette formule, l'intelligence de tous les autres faits deviendra facile. C'est là, du reste, le grand avantage du calcul : il réduit les observations les plus complexes à quelques faits élémentaires fort simples ; de telle sorte que ceux-ci une fois expliqués, les autres le sont du même coup, car ils découlent des premiers comme autant de corollaires nécessaires.

La formule en question suppose deux forces existant dans lescircuits électro-dynamiques savoir : 1° une action à distance agissant tantôt comme attraction, tantôt comme répulsion suivant le sens des courants; 2° une tendance de ces mouvements à donner une résultante unique facile à déterminer d'après les règles de la composition des forces statiques ordinaires.

Les considérations tirées des mouvements qui peuvent avoir lieu dans un fluide conduisent facilement à donner la raison de ces deux éléments; toutefois Ampère, afin de rendre les principes sur lesquels il fondait son analyse indépendants de toute idée théorique, aima mieux les regarder comme données expérimentales. Quant à nous, nous devons suivre une marche différente, et arriver par la théorie à démontrer les faits fondamentaux admis par Ampère[1].

Faisons remarquer tout d'abord que, même dans les fluides ordinaires, il se produit fréquemment des mouvements d'éloignement et de rapprochement qui nous sembleraient des attractions et des répulsions véritables si le

[1] Ampère, *Recueil*, etc., p. 215.

milieu dans lesquels ils se développent échappait à nos sens. Ne voyons-nous pas, généralement deux veines de direction opposée qui viennent à se heurter changer de direction et suivre la résultante des deux impulsions primitives? De même, un vent violent dévie un jet d'eau et le déplace dans le sens de sa propre direction, et réciproquement, un jet d'eau communique un mouvement d'ascension à la masse d'air environnante. En dirigeant un courant d'air à une petite distance d'une flamme, et parallèlement à sa direction, la flamme se dirige vers le point d'où l'air souffle, il y a en quelque sorte une attraction : dans le cas où le flux atmosphérique se fait en sens contraire du mouvement ascensionnel de l'air chaud; il y a éloignement ou répulsion[1]. Rappelons enfin les phénomènes d'aspiration qui accompagnent l'écoulement des liquides, et dont nous avons parlé assez ci-dessus : à tout ce que nous avons dit alors, comme exemple d'attraction apparente, on peut ajouter le fait très-connu d'une mince rondelle attirée contre une paroi plane dans laquelle se trouve une ouverture laissant échapper un jet d'air comprimé.

En examinant les choses au point de vue purement théorique, on peut dire que toute masse liquide qui se met en mouvement relatif par rapport aux objets circonvoisins détermine nécessairement dans le milieu ambiant une diminution de pression tout autour d'elle. Cela est une conséquence du principe de continuité, c'est-à-dire de ce fait fondamental que dans l'écoulement d'un liquide la section de la masse en mouvement est inversement proportionnelle à la vitesse. Par conséquent toutes les fois que dans une masse de fluide un mouvement prend naissance suivant une direction donnée, la section de la masse qui s'écoule deviendra plus petite, et par là il se formera dans le milieu envi-

[1] Ce phénomène s'observe facilement avec la flamme fuligineuse de l'essence de térébenthine.

ronnant un vide ou tout au moins une diminution de pression. Il s'ensuivra donc comme effet corrélatif une rupture d'équilibre, non-seulement dans le fluide lui-même, mais encore par l'intermédiaire de celui-ci dans les masses pondérables au milieu desquelles il coule. Ainsi lorsque le tuyau de décharge d'un réservoir plein d'eau est à parois flexibles, il éprouve une compression de dehors en dedans au moment de l'écoulement, par suite de la diminution de pression. Concluons donc que les *attractions et les répulsions électro-dynamiques peuvent résulter simplement des actions mécaniques d'un fluide*. A la rigueur nous pourrions nous contenter de reconnaître que rien ne s'oppose à accepter cette manière de voir, en attendant que des études théoriques ultérieures sur les fluides et la découverte de nouveaux faits expérimentaux viennent jeter une lumière plus vive sur ce sujet; cependant il ne sera pas mauvais de préciser ces indications générales.

Sans doute nous rencontrons une sérieuse difficulté à expliquer comment s'exerce à distance l'action des courants, que nous comprenons facilement lorsqu'il y a contact. Aussi est-il nécessaire de déterminer quelle peut être la modification qui a lieu dans l'éther environnant, par lequel se transmet l'action d'un point à un autre. En un mot, essayons de combler la lacune qui est inévitable lorsqu'on admet l'action *à distance*.

Les faits de l'induction dynamique nous ont prouvé que durant le passage continu du courant dans un conducteur, l'éther environnant est profondément modifié tout autour de ce même conducteur [1]. Cette modification est toujours faible quelque puissants que soient les courants employés, cependant elle peut être reconnue plus aisément à l'aide des aimants très-énergiques résultant de l'influence du

[1] Voyez les idées d'Ampère sur ce point dans *Recueil*, etc. (p. 214), et Felici, *Memoria sulla induzione* (*Annales de l'Université toscane*, vol. III, p. 9).

courant électrique sur le fer doux. Alors les effets sont notablement renforcés, et comme ils ne diffèrent en rien de ceux obtenus avec les courants seuls, il est préférable de les prendre comme sujets d'étude. Parmi les faits nombreux propres à mettre en évidence, les changements qui surviennent dans l'éther autour d'un conducteur traversé par le courant, nous rappellerons l'énorme résistance qu'on éprouve à entretenir la rotation d'un disque de cuivre entre les pôles d'un électro-aimant, la violence du bruit que fait l'étincelle électrique, jaillissant entre ces pôles, comment enfin un cube de cuivre animé d'une rotation rapide et placé sur la ligne polaire d'un électro-aimant, s'arrête lorsqu'on lance le courant dans le fil; tous ces faits nous prouvent qu'il y a là une force, c'est-à-dire une modification profonde de l'éther extérieur. Mais la permanence de cette force est mise en pleine lumière par une remarquable découverte de Faraday. Il a observé la déviation du plan de polarisation d'un rayon transmis par les substances diaphanes lorsqu'elles sont placées entre les pôles des aimants; le plan tourne dans le sens des courants ampériens que l'on pourrait concevoir dans la substance diaphane, si elle était un morceau de fer doux.

Nous étudierons plus loin les diverses particularités de ce phénomène; ici nous en déduirons seulement que dans les milieux répandus autour des aimants l'éther est profondément modifié, et que le mouvement circulaire imaginé par Ampère dans les aimants est fort probable. Jusqu'à présent les déviations du plan de polarisation n'ont pu être obtenues que dans les milieux pondérables, de telle sorte que nous ne pouvons rien en déduire relativement aux changements qui peuvent avoir lieu dans le vide; mais M. de la Rive vient de démontrer que ces effets sont proportionnels à la densité des masses employées, d'où résulte que dans les corps d'une faible

densité les effets peuvent ne pas être sensibles. Toutefois, considérant les analogies du vide et des diaphanes, on est porté à croire que les mêmes mouvements existent aussi dans le vide. Les mouvements circulaires dont la lumière nous révèle l'existence au sein des isolants sont du genre de ceux que depuis longtemps on sait produire avec les conducteurs soumis à l'action des courants et des aimants : par exemple, la rotation du mercure et des liquides répandus à sa surface.

Il y a plusieurs circonstances essentielles à considérer dans l'éther qui environne un aimant ou le conducteur du courant.

1° Lorsque le courant envahit un conducteur, il se forme autour du filet central, parallèlement à sa direction, un véritable flux, à peu près comme nous voyons le long des rives d'un fleuve se développer des remous sur une étendue déterminée ; ou bien encore une circulation s'établit suivant des orbites infiniment petites, toutes les fois que ce mouvement n'est pas rendu impossible par la difficulté que l'éther rencontre à se mouvoir dans l'intérieur de certaines substances. Dans ce dernier cas la communication du mouvement doit être comparée à celle qui détermine la résonnance de la colonne gazeuse renfermée dans un tube sur l'orifice duquel on dirige normalement un courant d'air ; en effet, les molécules aériennes tournent alors suivant des courbes fermées, dont l'amplitude égale celle de l'oscillation des mêmes molécules à l'intérieur de l'onde sonore, c'est-à-dire une fraction très-petite de la longueur d'onde. Évidemment l'un des deux mouvements se produit de préférence à l'autre, selon la nature du corps : ainsi aux conducteurs convient le premier genre de mouvement, aux isolants et au vide le second.

2° Outre le mouvement circulaire qui prend naissance dans le milieu, il faut aussi considérer la diminution de pression que produit autour du fil la vitesse du courant,

comme nous l'avons reconnu en parlant de l'induction. Par conséquent, lorsqu'il s'agit d'expliquer les actions électrodynamiques, on doit combiner les actions rotatoires avec cette seconde force, considération qui avait échappé à Ampère.

3° Il est nécessaire de ne pas perdre de vue le point fondamental suivant : ce que nous nommons courant n'est réellement qu'une succession de molécules qui s'avancent comme autant de projectiles animés d'une vitesse commune; il en résulte que les règles de la composition des forces de projections se doivent appliquer en réalité à chacun des éléments en particulier et non à cet ensemble idéal que nous nommons courant. Cette réflexion extrêmement simple nous apprend que les résultantes de ces mouvements se trouveront d'après les règles ordinaires de la composition des forces statiques, et nous comprenons comment Ampère a pu poser en principe fondamental que les éléments infiniment petits de courant (autrement dit les molécules dont nous parlions tout à l'heure) agissent les uns sur les autres conformément aux principes de la composition des forces. Pour en déduire la composition des courants angulaires, et leur tendance au parallélisme, il suffit de supposer que les divers éléments ou les molécules qui les composent doués de rotation; car, sans cette rotation, l'explication complète de la tendance au parallélisme est impossible.

4° La vitesse d'un courant étant considérable, la pression latérale ne demeure pas la même dans tous les sens; d'où production de mouvements à distance et d'un mouvement tourbillonnaire dans le milieu ambiant. Ce tourbillon prend naissance de la sorte : le filet central ayant une vitesse relative plus grande que les couches voisines, chaque molécule se trouve par là soumise à l'action d'un couple, elle prend un mouvement de rotation et se trouve entraînée dans le milieu ou règne la plus grande

vitesse, et là le couple cesse d'exister. Rappelons à ce propos une observation que chacun a faite et qui se trouve ici parfaitement à sa place. Dans les cours d'eau toutes les substances dont la densité est moindre que celle de l'eau et qui flottent à la surface, se réunissent vers le milieu, là où la vitesse a un maximum et la pression un minimum; celles qui sont hors du filet central ont un mouvement continuel de rotation, produit manifestement par la vitesse variable que possède le courant dans les parties éloignées du milieu, et qui forme un couple moteur.

Cela posé, examinons le cas de deux courants séparés par un milieu isolant; car lorsque deux conducteurs communiquent ensemble métalliquement, ils n'en forment qu'un seul.

Concevons (fig. 51) deux conducteurs AB, MN, animés par des courants parallèles et de même sens : deux actions bien distinctes se développeront autour d'eux.

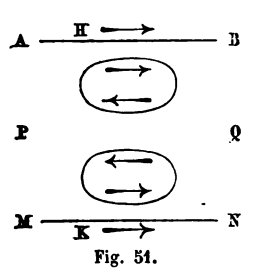


Fig. 51.

1° Une diminution de pression qui obligera l'éther environnant à se rapprocher des conducteurs, et comme dans les fluides le filet du milieu est toujours celui dont la vitesse est la plus grande, l'aspiration dont nous parlons commencera dans le conducteur lui-même et se propagera de proche en proche au milieu ambiant. L'action s'exercera à la fois sur les parties H et K, situées en dehors, et sur celles P Q, comprises entre ces mêmes conducteurs. Dans l'intervalle interposé, les deux effets s'ajoutent; l'aspiration intérieure sera prépondérante sur celle qu'ils exercent sur les corps extérieurs, et les conducteurs seront poussés l'un contre l'autre.

2° Le milieu interposé étant mauvais conducteur les mouvements circulatoires qui s'y établiront ne pourront

s'effectuer que suivant des orbites infiniment petites, et leur action se répétant de couche en couche toujours la même, donnera naissance à une disposition intérieure parfaitement semblable à celle qu'Ampère suppose dans les aimants. La résultante finale de tous ces mouvements sera donc celle de deux mouvements finis, allant à la rencontre l'un de l'autre à travers le milieu, lesquels étant de plus parallèles et de même sens, donneront lieu à un rapprochement, c'est-à-dire à l'attraction produite par l'aspiration des deux courants.

Supposons maintenant les deux fils parcourus par des courants de sens contraire; les courants élémentaires, qui naîtront dans le milieu compris entre les conducteurs, agiront en sens opposé et se heurteront les uns les autres; d'où s'ils sont d'égale intensité, tout mouvement cessera aussitôt dans le milieu PQ. Mais il faut considérer l'effet des chocs réciproques, celui de ces mouvements giratoires de directions contraires et celui des aspirations extérieures en H et K. Des premiers il résultera une rotation tendant à rendre parallèles les mouvements élémentaires, et des deux derniers une tendance à l'éloigner: l'effet de l'aspiration intérieure étant contrarié par le choc contraire des rotations opposées. Donc si toute rotation est empêchée, comme cela arrive avec certaines combinaisons de conducteurs, on obtiendra seulement un éloignement et une répulsion, qui sera égale à l'attraction du cas précédent. Mais pour la majeure partie des mouvements gyratoires, les choses se passent comme lorsqu'il s'agit des influences d'un mouvement de rotation sur un autre, lesquels, d'après les lois statiques de la composition des forces, doivent se réduire au parallélisme; par conséquent, dans le cas où la mobilité du fil est suffisante, il tournera sur lui-même et deviendra parallèle à l'autre. Ainsi la composition de ces courants élémentaires revient à celle des rotations ordinaires qui, en dernière analyse, dépendent de la com-

position statique des forces appliquées aux points de chacun des corps tournants.

On voit ainsi qu'Ampère, prenant toujours la composition de forces statiques comme point de départ de la théorie qui lui a permis de relier les nombreux phénomènes électro-dynamiques, a basé ses formules sur un principe que l'on peut regarder comme une conséquence du mouvement mécanique des fluides combiné avec les actions latérales. Et comme ces actions décroissent à mesure qu'augmente la masse qui doit être mise en mouvement, et celle-ci, pour toutes les actions que l'on suppose émanées d'un centre unique, croissant comme le carré des distances, de même ces actions, considérées dans leurs éléments, ne devront pas s'éloigner de cette grande loi naturelle.

La force avec laquelle réagissent l'un sur l'autre deux conducteurs finis quelconques, ou deux conducteurs hélicoïdaux nommés solénoïdes, ou deux aimants, n'étant qu'un cas particulier du principe sur lequel repose la formule fondamentale, se trouve ramenée à n'être qu'une conséquence naturelle du mouvement mécanique de l'éther. Le coefficient absolu de cette force a été déterminé par Cazin ; il a trouvé que l'action d'un courant capable de décomposer un équivalent d'eau, soit 9 milligrames en une seconde, est telle que, concentrée sur un conducteur linéaire d'un mètre de long et agissant à une distance d'un mètre, elle est égale à 188 milligrammes [1].

CHAPITRE XIII

SUITE DU MAGNÉTISME. — MAGNÉTISME TERRESTRE.

Les considérations précédentes suffisent à expliquer les réactions mutuelles des aimants, mais à cause de la

[1] Voy. Moigno, *Mondes, science pure*, 1863, p. 567.

très-grande importance du magnétisme comme force naturelle, nous devons présenter encore quelques réflexions relatives à sa manière d'agir et aux circonstances qui l'accompagnent.

La terre, comme on le sait, est en réalité un vaste aimant d'une puissance énorme, que Gauss évalue celle de 8464 trillions de barres d'acier pesant chacune une livre et aimantées à saturation[1]. Attendu l'action de cet aimant immense sur l'éther, le globe terrestre est enveloppé par un de ces tourbillons, dont nous avons parlé, qui l'accompagne dans sa course à travers l'espace, soit parce que notre planète entraîne avec elle une partie de l'éther environnant, soit parce que ce tourbillon se forme successivement aux divers points de la trajectoire terrestre. L'intensité magnétique du tourbillon terrestre est tellement énergique que nos aimants artificiels, qui, pour de faibles distances, lui résistent efficacement, deviennent promptement incapables de l'équilibrer. Elle pénètre les enveloppes de fer, comme nous le voyons dans les bâtiments blindés, dont les énormes masses métalliques dévient la résultante terrestre à peine de quelques degrés. Nobili comparait les tourbillons des aimants ordinaires aux nœuds du bois qui dévient les fibres ligneuses de leur direction naturelle seulement dans un espace assez resserré autour du point qu'ils occupent. Cela provient de l'énorme disproportion des masses aimantées.

Avant les découvertes d'Ampère, on ne savait comment expliquer l'existence d'une intensité magnétique aussi considérable, dans un corps renfermant en définitive une quantité relativement minime de matières réellement magnétiques. On invoquait des aimants intérieurs, mais cette hypothèse inconciliable avec la haute température du centre du globe, se trouvait encore insuffisante à expliquer les lois de la

[1] Gauss, *General theory of terr. magn.*, n° 31.

distribution du magnétisme à la surface terrestre. Ampère montra comment un corps, en l'absence de toute matière de nature ferrugineuse, pouvait acquérir une puissance magnétique énergique par le seul fait de l'établissement d'une circulation d'éther autour de sa surface, quelle que fût d'ailleurs la cause de ce mouvement. Mais rien ne dit que le courant éthéré qui, enveloppant notre globe, détermine les effets de magnétisme terrestre, soit le plus intense de ceux qui peuvent exister dans l'espace; il est donc rationnel d'admettre que ce tourbillon magnétique est constitué seulement par une fort petite portion de l'éther au milieu duquel flotte la terre; et nous ne sommes pas en mesure d'assigner quelle est son action maximum.

Une expérience bien connue donne une idée de la distribution de la force magnétique autour d'un aimant. On couvre de limaille de fer une feuille de papier posée sur un aimant : les parcelles métalliques se disposent en lignes courbes convergentes, dont les extrémités se réunissent au niveau des pôles. Ces courbes ont été nommées lignes de force magnétique, mais il importe de savoir qu'elles ne représentent nullement, ni la direction du courant à l'intérieur des tourbillons, ni les lignes de mouvement de l'éther, mais seulement la disposition des lignes le long desquelles la force résultante des deux actions polaires est d'une intensité et d'une direction déterminée. Ces lignes sont utiles à considérer lorsqu'il s'agit d'expliquer la perturbation que la présence d'un corps jette dans l'espace nommé champ magnétique. En outre, comme elles se forment à travers les corps isolants, elles nous apprennent que l'action du tourbillon magnétique n'est pas une circulation plus ou moins étendue, s'accomplissant dans l'espace ambiant ainsi que cela se fait au sein des conducteurs mis en communication avec la pile voltaïque; mais qu'elle consiste en une rotation suivant des orbites infiniment

petites, dont l'effet résultant ne diffère pas, en définitive, de celui d'un mouvement circulatoire fini. Nous pouvons nous former une idée de la manière dont un tel mouvement s'accomplit dans l'éther par ce qui arrive lorsqu'un cours d'eau traverse une masse liquide en équilibre; il y produit une multitude de petits tourbillons latéraux, dont le nombre et l'étendue diminuent avec la distance; et, à mesure que les premiers formés s'effacent et disparaissent, de nouveaux se reproduisent sans cesse, tant que dure le courant.

Ce que nous nommons *force coercitive* dans les aimants, n'est aûtre que la propriété spéciale à certaines substances (l'acier surtout) de conserver orientés les mouvements circulaires intérieurs. Mais ici, comme dans tous les cas d'actions semblables, une telle orientation ne peut se réduire en activité sans un travail initial, lequel est évaluable en équivalents mécaniques. On peut le rendre sensible en le répétant plusieurs fois de suite, à quoi il est facile d'arriver à l'aide de substances dans lesquelles l'orientation n'est pas permanente, du fer doux, par exemple. Ainsi M. Soret, ouvrant et fermant alternativement le circuit d'un électro-aimant, de façon à aimanter et à désaimanter le fer doux, plusieurs fois de suite, a reconnu que la force du courant et la chaleur dégagée dans le circuit, subissaient une notable diminution. Lorsque l'attraction exercée par un électro-aimant sur son contact est employée à produire un travail mécanique, cet effet s'obtient aux dépens de la chaleur du circuit. (Favre.)

Dans l'aimantation par les procédés ordinaires de simple ou de double touche, le travail en question paraît se faire sans consommation de force vive; bien plus, il semble que l'aimant engendre de lui-même une force dont on ne peut assigner l'origine en s'appuyant sur la grande loi de la constance de la force. Aussi bien des gens s'y sont trompés et ont cherché à tirer de là le moyen de réaliser

le mouvement perpétuel. Un aimant en attirant le fer exécute un travail, en même temps il perd de son énergie, et quand le fer s'attache à l'aimant, l'action exercée à distance par ce dernier sur d'autres morceaux de fer doux ne reste plus la même. L'aimant récupère toute sa force lorsqu'on le sépare du contact; mais, pour y arriver, il faut dépenser un travail égal et contraire à celui fait par l'aimant au moment de l'attraction.

Semblable chose s'observe dans le problème inverse, c'est-à-dire quand, par une série de magnétisations et de démagnétisations successives obtenues par voie mécanique, on produit un courant. La machine magnéto-électrique de l'*Alliance*, construite pour obtenir de la lumière électrique au moyen de courants d'induction développés par des aimants, nous fournit une exemple remarquable d'absorption de travail pendant une action magnétique. Quand la machine tourne à vide, c'est-à-dire lorsque les circuits sont ouverts, la force d'un homme suffit à mettre ses disques en mouvement; mais, lorsque les circuits sont fermés et qu'elle donne naissance aux courants induits, la force de deux chevaux est nécessaire pour la maintenir en activité. Les données numériques fournies par cette machine ont permis de calculer l'équivalent mécanique de la chaleur, le magnétisme servant d'intermédiaire, et le résultat auquel on est arrivé est identique à celui de Joule; cependant ici la chaleur est produite par l'électricité, comme dans l'expérience du disque de cuivre tournant entre les pôles d'un électro-aimant, ce qui nécessairement introduit dans les calculs des éléments étrangers dont il est difficile de tenir compte.

Il suit de là, Ampère en avait déjà fait la remarque, l'impossibilité de réaliser le mouvement perpétuel avec les aimants comme avec tous les impondérables. En effet, les aimants agissent comme des forces dirigées vers des centres fixes; ils ne peuvent donc augmenter en rien la

force vive, et il n'y a pas en eux une cause permanente qui excite incessamment un nouveau travail, comme est l'action chimique dans la pile.

On n'avait pas réussi jusqu'à ces années dernières à expliquer la théorie de la polarité magnétique à l'aide des principes de la mécanique ordinaire, aujourd'hui les études pratiques des phénomènes de rotation ont vivement éclairé la question. L'instrument nommé gyroscope donne une idée assez nette de la façon dont un simple mouvement mécanique, peut produire les phénomènes d'*orientation* que nous présentent les aimants. La règle que *les mouvements rotatoires tendent au parallélisme*, renfermant tous les cas de réactions réciproques entre les corps en rotation, résume en même temps la théorie des mouvements magnétiques. Les démonstrations, données par Ampère pour les aimants, sont encore applicables, comme on l'a montré depuis, aux masses métalliques qui, lorsqu'on les met en rotation par des moyens appropriés, nous présentent des manifestations qu'on pourrait dire *polaires*. Si bien qu'étant donné le principe des rotations magnétiques, et leur appliquant la théorie très-simple des mouvements circulaires, on pourrait remonter à l'action de deux courants rectilignes en suivant un ordre de raisonnement inverse de celui que nous avons tenu ci-dessus.

Toutes ces vues théoriques deviendront parfaitement claires si nous nous arrêtons un instant sur les curieux phénomènes présentés par les corps en rotation. Soit (fig. 52) un tore A tournant autour d'un axe placé horizontalement dans une chape circulaire B. Cette chape est elle-même suspendue dans l'intérieur d'une autre par des pointes CC′ qui lui permettent toute liberté de mouvement. Cette dernière est attachée à l'extrémité d'un cordon tordu sur lui-même. La torsion donne naissance à un couple qui tend à faire tourner le tore autour de la

verticale passant par le fil de suspension; mais le disque métallique n'obéit pas à cette force, tant que son axe, qui a été tout d'abord placé horizontalement, n'est pas devenu



Fig. 52.

parallèle à la direction de l'axe de la rotation que tend à lui donner la torsion du fil. Par là nous voyons la chape extérieure qui porte le cercle intérieur rester d'abord immobile malgré la torsion, pendant que le cercle qui porte le tore se relève peu à peu par une des extrémités du diamètre correspondant à l'axe, jusqu'à devenir verticale et parallèle à la direction de la corde : à ce moment, tout le système cède à la force de torsion et se met à tourner autour du fil comme axe. Une personne qui ignorerait les propriétés des corps tournants, et qui tiendrait un gyroscope dont la chape pût être saisie d'une seule main, constatant que la masse ne présente pas une égale mobilité dans les divers sens, se figurerait que quelque action mystérieuse sollicite le tore à prendre une di-

rection fixe dans l'espace, de préférence à toute autre. Elle croirait, par exemple, que cet instrument tend vers le pôle de la sphère céleste, car on sait que le gyroscope s'oriente de la sorte si bien qu'il peut servir à indiquer la direction de l'axe terrestre.

Pour qui connaît la théorie des mouvements de rotation, le mystère s'explique aisément, car l'effet observé résulte de ce que la rotation de l'instrument tend à se mettre parallèle à la rotation terrestre.

Cette tendance, comme nous l'avons déjà dit, n'est pas due à quelque force mystérieuse, elle est simplement la résultante de la composition statique, des diverses forces impulsives dont les molécules sont animées chacune en particulier, avec les réactions engendrées par la force centrifuge et par la cohésion des parties du corps; telles sont les composantes dont la combinaison donne lieu à ces mouvements singuliers qui à première vue semblent sans analogie avec tous ceux connus.

Nous citerons encore une expérience prouvant qu'un mouvement rotatoire donne naissance à une véritable translation, toutes les fois que de semblables déplacements sont nécessaires pour maintenir le parallélisme des axes. On prend (fig. 53) un tore en bronze tournant autour d'un axe placé dans une chape circulaire, dans laquelle est implantée une tige métallique. Supposons cette tige perpendiculairement placée relativement à l'axe de rotation du tore et fixée par sa partie supérieure à une pièce mobile autour d'un axe *ab*, faisant partie d'un support S placé sur une barre horizontale ou portant d'un appareil semblable à celui qui sert aux expériences sur la force centrifuge. Le support S est installé de telle sorte que l'axe *ab* soit perpendiculaire au rayon du cercle décrit par le portant AB, si bien que le gyroscope peut osciller autour de *ab*, comme un pendule dans le plan du portant, et par conséquent subir l'influence de la force

centrifuge. Le tore mis en rotation, on fait tourner AB autour de CD. Voici ce que l'on observe. Pour un certain sens de la rotation du portant, le pendule gyroscopique s'écarte de sa position d'équilibre, en s'éloignant de l'axe CD, mais si l'on change le sens de la rotation du portant, on voit le pendule quitter la position verticale et se rapprocher de l'axe CD, malgré l'effet de la force centrifuge qui

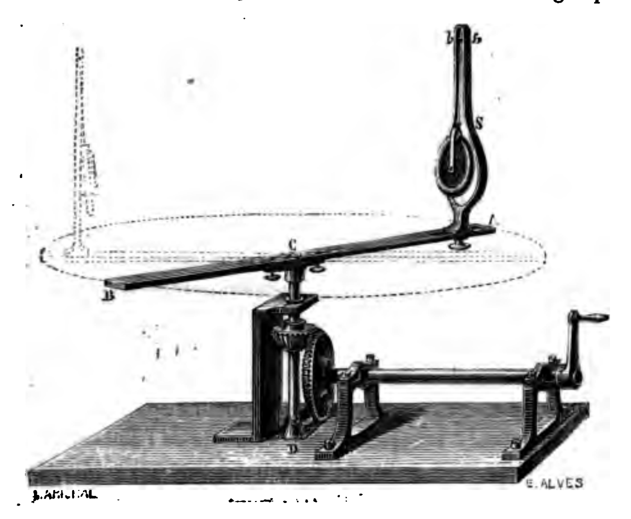


Fig. 53.

tend à l'éloigner du centre du mouvement. Dans le cas où le support S serait installé sur le portant de façon à ce que le pendule gyroscopique puisse osciller dans un plan perpendiculairement au rayon du cercle décrit par AB, on verrait pendant la rotation de l'appareil le pendule quitter la verticale et s'incliner de façon à précéder le support S ou à rester en arrière suivant le sens de la rotation du portant.

Les mouvements sur lesquels nous venons de dire quel-

ques mots sont parfaitement semblables à ceux observés avec les aimants. Supposons des aimants fixés par leur centre de gravité, tout mouvement de translation étant impossible, ils se disposent de telle sorte que les rotations de leurs petits tourbillons moléculaires deviennent parallèles; par conséquent, les pôles de même nom se repoussent, car lorsqu'ils sont placés l'un en face de l'autre, leurs rotations se font en sens inverse; quant aux pôles contraires, ils s'attirent, parce que les rotations y sont de même sens. — Considérons maintenant les aimants mobiles dans toutes les directions, ils s'éloignent ou se rapprochent, ou, comme l'on dit, se repoussent ou s'attirent, suivant que l'un ou l'autre de ces mouvements les amène plus loin ou plus près du centre de mouvement, dans la position déterminée par la résultante des actions rotatoires. Le milieu qui sert à la transmission de ces mouvements de rotation est l'éther ambiant qui lui-même entre en rotation. Il se produit là quelque chose de comparable à ce qui a lieu lorsqu'un gyroscope étant plongé dans un liquide animé de rotation, la masse fluide force l'instrument à prendre une rotation parallèle à la sienne.

Pour nous former une image sensible de l'état intérieur des aimants, nous pouvons recourir à une représentation mécanique; imaginons un grand nombre de petites hélices ou de petits moulinets semblables à ceux qui servent de jouets aux enfants, adaptés à un même axe, autour duquel ils peuvent tourner avec une grande facilité; lorsque le vent vient à agir sur eux, ils prennent tous un mouvement de rotation dans le même sens : s'il a quelque moulinet ayant les ailes disposées en sens contraire des autres, il tournera en sens opposé.

Les expériences faites avec le gyroscope nous montrent donc que le principe de la composition des rotations explique non-seulement les mouvements d'*orientation* des aimants, mais aussi ceux de translation. En outre, pour

comprendre exactement le mécanisme des mouvements de translation, on doit tenir compte du principe mécanique général de la diminution de pression, qui existe autour d'un centre de circulation, quel qu'il soit ; ce qui détermine une véritable attraction, c'est-à-dire un rapprochement des parties. Ainsi l'hypothèse d'Ampère, regardée par certains comme la plus compliquée de toutes celles imaginées afin d'expliquer les phénomènes magnétiques, est au contraire la seule qui en donne une théorie fondée exclusivement sur les principes de la mécanique. Mieux encore, elle jette une grande lumière sur le principe général des attractions ; car, ayant démontré que l'une de ces actions résulte de mouvements mécaniques, on pourra toujours en dire autant des autres, quoique leur manière d'agir soit plus obscure.

Nous savons que l'une des propriétés les plus singulières du magnétisme est d'appartenir à un petit nombre de substances, et même, pratiquement parlant, à une seule substance, le fer. Mais si la théorie que nous développons est vraie, et si l'action magnétique consiste en une modification spéciale, produite dans la masse d'éther qui est dans l'intérieur de l'aimant et qui l'environne, comme cet éther se trouve aussi en mouvement dans tous les corps, évidemment l'action magnétique ne doit pas être complétement sans influence sur les autres substances, et l'on doit observer des phénomènes différents selon que l'on considère l'un des deux cas suivants :

1° Il peut se faire que les petits tourbillons moléculaires, existant à l'intérieur des corps, soient déjà tous dirigés vers un même point, ou tout au moins faciles à orienter dans une direction commune.

Ou bien : 2° ils peuvent résister à l'orientation et être liés entre eux et avec les molécules autour desquelles ils circulent, au point de ne pas avoir une mobilité suffisante pour céder au tourbillon magnétique.

Dans le premier cas, les courants moléculaires prendront la direction du tourbillon magnétique lui-même, et le corps se dirigera de façon à ce que la ligne de leur somme maximum soit disposée suivant l'axe du tourbillon. Quelquefois cette ligne pourra ne pas coïncider avec la plus grande dimension du corps; ainsi en employant des artifices particuliers, il est possible d'aimanter un barreau rectangulaire d'acier, de manière à obtenir les pôles dans le sens de la largeur. Mais, même dans ce cas, la loi d'attraction reste la même, les mouvements rotatoires tendent au parallélisme : autrement dit, les pôles contraires se dirigent toujours l'un à une extrémité, l'autre à l'extrémité opposée. On observe un effet de cette espèce avec certaines pièces de laiton et de bronze contenant une minime quantité de fer (Pianciani), qui reçoivent la polarité dans le sens de leur épaisseur. Ces cas sont exceptionnels. La liste des substances qui se comportent comme le fer est aujourd'hui assez étendue; elle ne comprend plus seulement le chrome, le nickel et le cobalt, mais des corps divers, entre autres le gaz indispensable à l'entretien de notre vie, l'oxygène [1].

Si la substance est constituée de façon à ne pas permettre un déplacement facile aux courants moléculaires, le corps n'échappera pas à cause de cela à l'influence du tourbillon magnétique, seulement son action sera contrariée; toutefois, pour une position convenable du corps, l'action deviendra manifeste, et son tourbillon moléculaire le disposera de telle sorte qu'il éprouvera la plus petite résistance de la part du tourbillon magnétique, ce à quoi il arrivera en s'éloignant de la partie où l'action est la plus énergique; en d'autres termes nous obtiendrons une répulsion apparente. De pareils corps

[1] Pour de plus amples renseignements, voir le *Traité sur l'induction* de Matteucci, et le *Traité d'électricité* de de la Rive, et l'excellent *Traité de physique* de Daguin.

existent, on les a nommés *diamagnétiques* afin de les distinguer des autres, qui dans le principe avaient été appelés par opposition *paramagnétiques*, dénomination aujourd'hui abandonnée. Nous examinerons bientôt les propriétés de ces corps singuliers, pour le moment terminons ce chapitre en indiquant sommairement les faits qui démontrent la résistance exercée par ce tourbillon magnétique et que nous avons déjà cités plusieurs fois (voir page 441).

On suspend entre les pôles d'un très-puissant électro-aimant avec un cordonnet de soie, un petit cube de cuivre ayant environ 15 millimètres de côté; le fil, après avoir été fortement tordu suivant son axe, est abandonné à lui-même, il prend alors un rapide mouvement de rotation; quand la vitesse est à son maximum on lance un courant dans le fil des bobines, aussitôt le cube s'arrête et demeure immobile malgré la forte torsion du cordon. Le courant cessant dans l'électro-aimant, le cube recommence à tourner avec la même vitesse qu'auparavant; que l'on excite de nouveau l'aimant, le cube devient immobile, et plusieurs fois de suite cette admirable et curieuse expérience peut être répétée toujours avec le même succès.

Or, quelle puissance invisible arrête la masse métallique et l'empêche d'obéir à la rotation que tend à lui imprimer la force de torsion? Assurément c'est l'action du tourbillon magnétique, et comme l'expérience faite ici avec le cuivre réussit avec tous les autres métaux, à cette différence près que l'arrêt a lieu plus ou moins promptement suivant leur force conductrice, on peut dire que la résistance du champ magnétique se fait sentir à tous les corps.

Ordinairement ces résultats sont attribués aux courants d'induction, mais en analysant exactement les phénomènes on voit qu'une telle explication est insuffisante. A la vérité, ces courants se produisent dans la masse du

cube, et si la substance était isolante et n'en admît pas, les effets seraient insensibles; mais pour qu'ils se développent, il est nécessaire que le cube se meuve, et tant qu'il reste en repos le courant n'a pas lieu; donc, si le courant peut arrêter le cube, il est incapable de le maintenir immobile. En effet, l'arrêt du cube met fin à l'induction, tandis que la torsion du fil agit d'une manière continue sur le métal, par conséquent si le courant induit était la cause efficiente le mouvement du cube ne devrait pas cesser, mais simplement éprouver un ralentissement jusqu'à ce qu'un équilibre fût établi entre la force de torsion et la réaction des courants induits. Or le cuivre reste immobile dans le champ magnétique; donc il y a là un obstacle sans cesse renouvelé qui prend origine dans les pôles de l'aimant.

Tous ces faits nous paraissent très-simples à comprendre, lorsqu'on se laisse guider par les considérations développées dans les paragraphes précédents. Le cuivre n'appartient pas à la classe des corps qui permettent l'orientation de leurs courants moléculaires, et le tourbillon magnétique, en faisant irruption dans sa masse, se brise et se disperse; il en résulte un frottement qui arrête le mouvement de cube, aussi longtemps que durent l'état de circulation établie au sein de la masse métallique, l'influence du tourbillon magnétique et la torsion du fil. Faisons même remarquer que le courant d'induction qui dès l'abord s'établit dans le cube au moment de la fermeture du circuit voltaïque est dû, en définitive, à la même cause, c'est-à-dire à un reflux du fluide éthéré forcé à prendre une nouvelle disposition à l'intérieur du corps, comme nous l'avons déjà dit en parlant de l'induction électro-dynamique (chap. XII). Les corps isolants sont très-peu influencés par ce magnétisme dit de rotation : la raison en est évidente : ils ne laissent pas pénétrer à l'intérieur de leur masse le mouvement du tourbillon lui-même,

car ils n'admetteut le mouvement longitudinal que d'une manière très-incomplète, comme nous le verrons tout à l'heure.

Le frottement du tourbillon magnétique sur une masse métallique animée de rotation, est rendu aussi palpable que possible par l'expérience du disque tournant entre les pôles d'un électro-aimant. Ici, c'est par l'intermédiaire du frottement de ce frein invisible que le travail mécanique se transforme en chaleur, et l'éther renfermé dans le métal agit à la façon d'un fluide ordinaire. Ne voit-on pas le mouvement d'une roue tournant au sein d'une masse liquide, être gêné par le milieu environnant, et une certaine force vive être alors absorbée et convertie en chaleur? (Joule.) Ce frottement virtuel engendre la vibration thermique des molécules, souvent à un degré suffisant à fondre les alliages, dont le point de liquéfaction est peu élevé. (Tyndall.)

Ces faits mettent en évidence un autre fait très-intéressant, la résistance de l'éther au mouvement de la matière pondérable; et, envisagés à un point de vue plus général, ils nous montrent combien il est inexact de dire, comme on le fait bien souvent, que l'éther ne résiste pas, puisque ces phénomènes ont lieu dans le vide, là où on ne saurait imaginer autre chose que l'éther. Seulement, vu la subtilité et la mobilité extrêmes de ce fluide, il n'oppose de résistance sensible que lorsqu'il est animé d'une vitesse énorme et, très-vraisemblablement, il en est ainsi dans les expériences citées plus haut. On voit aisément quelles importantes conséquences on pourrait tirer de là, relatives au mouvement des corps célestes. Mais poursuivons les recherches expérimentales.

CHAPITRE XIV

DIAMAGNÉTISME. — ACTION DU MAGNÉTISME SUR LES CORPS TRANSPARENTS.

Nous sommes en droit de conclure de la série très-étendue d'observations et d'expériences examinées jusqu'ici, que les phénomènes qui se manifestent dans les corps sont des affections particulières de la matière, envisagée sous deux états différents : un que nous nommons matière pondérable, et qui est sa forme grossière et composée; l'autre qui est un état d'atténuation et de subtilité extrêmes, qu'on nomme éther ou impondérable. Toutefois il nous est impossible de regarder l'éther comme élément chimique du corps; cela ne pouvant se dire que des molécules pesantes qui forment partie invariable d'autres molécules pesantes de même genre.

L'éther pénétrant tout, on était en droit de penser que tous les corps devaient être influencés plus ou moins par les aimants, parce que ceux-ci donnant naissance à un tourbillon qui les enveloppe complétement, les divers corps plongés dans ce tourbillon en subissent nécessairement l'action. L'éther une fois admis, le magnétisme devenait une force universelle. Cette conséquence se trouvait étrangement contredite par le très-petit nombre des corps affectés par le magnétisme, de telle sorte qu'elle devenait une objection contre la théorie elle-même. Mais toute difficulté a disparu depuis les découvertes de Faraday. Ce physicien a prouvé que réellement, tous les corps sont sujets à l'action magnétique, et cela indépendamment du fer qu'elles peuvent renfermer; bien plus, lorsqu'elles en contiennent, la manière dont se comporte ce métal est entièrement différente de celle que l'on connaissait depuis

longtemps. Ainsi le magnétisme qui donna à Kepler la première idée de la force régulatrice de l'univers, reprend dans la science le rang de force cosmique, et ces phénomènes si curieux et si inattendus, loin de jeter quelque trouble sur les idées théoriques exposées précédemment, viennent au contraire les confirmer d'une manière éclatante comme nous allons le faire voir.

Le caractère distinctif de l'action magnétique, c'est que le corps qui y est soumis, est attiré par l'aimant, et se place de façon à ce que sa plus grande dimension soit dans la direction de la ligne des pôles, c'est-à-dire prend la position dite *axiale* ou *polaire*. Au contraire la plupart des autres corps sont repoussés par l'action magnétique et prennent une position *équatoriale*, telle que leur longueur se met à angle droit avec la ligne de jonction des pôles. La découverte de cette nouvelle condition magnétique est due à Faraday, qui la nomma *diamagnétisme*.

Un petit barreau de bismuth, d'antimoine, de phosphore, de verre pesant (boro-silicate de plomb), et d'un grand nombre d'autres substances, suspendu dans le champ magnétique d'un puissant électro-aimant, se place perpendiculairement à la ligne des pôles. Dans le principe, cette direction fut attribuée à une faible polarité magnétique transversale, qui se développe assez facilement dans le laiton, le bronze et un petit nombre de substances susceptibles de s'aimanter légèrement (voy. chapitre précédent); mais des recherches très-délicates ont montré qu'il s'agissait là d'une action différente. On expérimenta avec des balles de substances fortement actives, de bismuth, de verre pesant par exemple, attachées à de longs fils, ou fixées à l'extrémité de leviers horizontaux extrêmement mobiles; lorsqu'on les mettait en regard d'un pôle, quel qu'il fût du reste, on constatait une répulsion manifeste et tellement prononcée que les substances allaient

se fixer loin du pôle magnétique; et, quand on les plaçait entre les deux pôles, elles se fixaient à égale distance de chacun d'eux, c'est-à-dire là où l'action magnétique était minimum. Par conséquent la position équatoriale que prennent certains barreaux est tout simplement un effet de répulsion exercée par les aimants; cette direction étant celle le long de laquelle la force sollicitante est minimum.

Les recherches entreprises dans le but de savoir si les substances diamagnétiques présentent une polarité contraire à celle de l'aimant inducteur, n'ont pas réussi à trancher la question, et plusieurs physiciens distingués soutiennent encore la doctrine de la polarité renversée. M. Tyndall, à l'aide d'un ingénieux appareil, est parvenu à obtenir la déviation d'un système d'aiguilles aimantées très-sensible, au moyen de barreaux diamagnétiques mis en mouvement dans des hélices traversées par un courant; et il regarde les mouvements des aiguilles comme des effets de la polarité diamagnétique. Mais on peut interpréter autrement les résultats de cet habile observateur. Sans entrer dans une discussion contradictoire à ce propos, nous ferons remarquer qu'il n'y aurait aucune impossibilité à ce que, sous l'influence du mouvement magnétique, il se développe à l'intérieur et à l'extérieur de certains corps une rotation contraire à celle du tourbillon inducteur. L'idée peut paraître étrange à première vue; cependant, pour reconnaître qu'elle n'a rien d'absurde, il suffit de se rappeler ce que nous disions tout à l'heure des moulinets dont les ailes ou hélices seraient disposées en sens inverse; car ceux-ci, placés au milieu d'un même courant, tourneraient en sens contraire. Il est possible que dans l'expérience de M. Tyndall, le courant du tourbillon magnétique renforce non-seulement les courants moléculaires dirigés dans son sens, mais aussi ceux de sens opposé.

Si les rotations sont différentes, si les unes s'effectuent

dans un sens et les autres en sens contraires, cela tient très-probablement à la forme des molécules intégrantes; autour desquelles elles s'accomplissent. Ces molécules ont des moments d'inertie inégaux, toutes leurs dimensions ne sont pas les mêmes, l'inclinaison des lignes qui déterminent leur figure extérieure est très-variable, de là une facilité à entrer en mouvement plus grande dans telle direction que dans toute autre. Nous trouvons là précisément une raison pareille à celle qui fait que deux hélices inclinées en sens inverse, placées dans le même courant, tournent en sens contraire. C'est une observation déjà ancienne, que la substance la plus magnétique est précisément celle dont la structure fibreuse est la plus prononcée, preuve certaine que la forme des molécules n'est pas indifférente. En outre, rappelons-nous que, dans les questions de mécanique, chaque action particulière ne doit être envisagée que comme partie de l'action générale qui s'exerce sur tout le système : ainsi nous voyons le moulinet de Woltman se maintenir toujours en avant dans le sens du courant par l'effet du courant lui-même agissant sur une plaque formant gouvernail et fixée à l'arrière de l'instrument; de même, au sein des substances diamagnétiques, il peut naître une telle combinaison de mouvements que l'action exercée sur une partie oblige l'autre à marcher en sens contraire du courant, comme la réaction exercée par le gouvernail d'un navire, fait souvent avancer celui-ci contre le vent. Par conséquent, l'aimantation du fer dépendant non de la création de courants nouveaux, mais de la facilité avec laquelle s'orientent les courants préexistants dans les circuits moléculaires; il n'est pas impossible que, dans des circonstances particulières, les courants contraires soient les plus aisés à orienter. Rien ne s'oppose donc d'une façon absolue à la possibilité d'une polarité *diamagnétique*.

Les aimants agissent non-seulement sur les solides,

mais encore sur les liquides et les gaz; les flammes, surtout celles chargées de carbone subissent une violente répulsion de la part des aimants, l'oxygène au contraire est magnétique.

L'intensité absolue de ces diverses actions, même des plus énergiques, est très-petite comparativement au pouvoir magnétique du fer; ainsi représentons par 1000 le pouvoir magnétique du fer. On trouve à poids égal +337 pour l'oxygène et +140 pour le perchlorure de fer en solution alcoolique; —3 pour l'eau et —65 pour le bismuth[1]. Ces valeurs sont en général assez faibles, à l'exception de celle appartenant à l'oxygène qui est la plus grande, circonstance qui doit exercer une certaine influence sur la variation du magnétisme terrestre. L'atmosphère entière équivaut sous le rapport magnétique à une enveloppe de fer dont la terre serait recouverte sur une épaisseur d'un dixième de millimètre. On conçoit qu'une pareille couche continuellement agitée puisse troubler l'aiguille aimantée, et que son pouvoir magnétique dépendant de la température, son échauffement aux différentes heures du jour puisse concourir à la production des variations diurnes de la boussole, en plus de l'action bien connue de l'électricité atmosphérique.

Parce que ces forces sont extrêmement peu énergiques, il ne faut pas croire qu'on puisse les négliger dans l'économie des forces naturelles. Au contraire, sous le rapport de l'intensité, elles se placent bien avant la gravitation universelle, alors même que leur action s'exerce sur des masses égales. Les expériences comparatives de Reich, Baily et Cavendish ne laissent aucun doute à cet égard. On sait qu'il a fallu des masses d'un poids de plusieurs milliers de livres pour imprimer à l'aiguille d'une balance de torsion une déviation moindre que

[1] Voyez pour d'autres nombres Daguin, 2e édition, t. II, p. 381-784.

celle obtenue en faisant agir sur une balle de bismuth un électro-aimant d'une puissance ordinaire.

Jusqu'ici aucune relation n'a été trouvée entre le pouvoir diamagnétique d'une substance et ses autres propriétés physiques et chimiques; seulement tout indique qu'il dépend de la structure moléculaire et que les phénomènes de cet ordre sont intimement liés au mouvement électrique intérieur, qui se traduit à nous par les courants thermo-électriques. Dans une question aussi obscure, nous devons savoir profiter des moindres analogies; il est donc utile de remarquer que les corps les plus diamagnétiques, le bismuth et l'antimoine, sont précisément parmi les substances conductrices celles qui, accouplées, donnent naissance à des courants thermo-électriques très-énergiques. Toutefois disons que tandis qu'ils donnent des courants de sens contraire, tous deux sont diamagnétiques; les deux propriétés ne sont donc comparables qu'à certains égards.

La structure moléculaire, soit naturelle, soit artificielle c'est-à-dire communiquée aux substances par la compression ou tout autre procédé mécanique, influe d'une manière très-prononcée sur la direction que prennent ces corps déplacés dans le champ magnétique. Les métaux cessent d'être diamagnétiques lorsque par la fusion ils abandonnent l'état solide; nous savons que dans les mêmes conditions, ils ne donnent plus naissance à des courants thermo-électriques. Quant aux corps non métalliques, le phosphore, l'eau, les gaz, la chaleur ne détruit pas leurs propriétés diamagnétiques. De là nous pouvons déduire que dans ces derniers la qualité diamagnétique dérive de courants rigoureusement moléculaires tandis que dans les métaux la circulation des courants s'effectue autour de la masse finie des molécules intégrantes. Ce fait nous ramène aux idées exposées plus haut relativement à la différence du mouvement circulatoire électrique dans les métaux et dans les isolants, et confirme ce que nous disions alors, à savoir

que dans les métaux la circulation s'effectue dans des masses sensibles, tandis que dans les isolants elle est moléculaire. Nous avons remarqué à ce propos que le fer, amené à l'état de fusion, perd pour ainsi dire complétement sa vertu magnétique, car pour la rendre sensible il faut user des moyens les plus puissants.

Les substances faiblement magnétiques agissent comme si elles étaient diamagnétiques lorsqu'elles sont réduites en plaques minces dans certaines conditions. Matteucci, examinant les corps dont la densité par des procédés convenables est rendue inégale dans les divers sens, est arrivé à la règle suivante : *Le corps se dirige de telle sorte que la ligne de compression maximum soit disposée axialement quand la substance est magnétique et équatorialement lorsqu'elle est diamagnétique*[1]. Exemple : un cube de bismuth comprimé se fixe avec la ligne de compression équatorialement et un cube fait de lames minces artificielles s'oriente de façon à ce que les lames soient en position équatoriale, chacune d'elles agissant comme un petit barreau : au contraire des cubes taillés dans du bismuth cristallisé suivant différents plans de clivage, sont neutres pour certaines directions de clivage par rapport aux faces artificielles ; mais en général le plan du clivage le plus facile se dirige axialement dans les substances magnétiques et équatorialement dans les diamagnétiques. Ainsi dans ces cas chacune des petites lames se comporte comme un barreau isolé. Dans le cas où ces trois clivages sont égaux, comme dans le sel gemme, ou nuls, comme dans le quartz, les corps ne s'orientent pas. Les substances fibreuses, l'ivoire par exemple, se placent équatorialement.

La position définitive d'une substance dans le champ magnétique dépendant, comme on le voit, de la forme extérieure et de l'agrégation moléculaire, il était naturel

[1] *Traité d'induction*, p. 254.

d'examiner sous ce rapport les cristaux dont la structure n'est pas la même dans les divers sens. Des recherches ont été entreprises par Plucker puis par d'autres, et on pensa d'abord que les résultats obtenus, relativement à la distribution intérieure de l'éther revenaient à ceux déjà fournis par l'étude des propriétés optiques. En effet dans un grand nombre de cristaux à un seul axe, celui-ci se dispose axialement pour les substances dites attractives par les opticiens, dont l'axe de densité maximum coïncide avec l'axe optique; pour les autres dites négatives, il se place équatorialement. Enfin, dans les cristaux à deux axes, c'est une ligne équidistante de chacun d'eux qui prend la position axiale. C'était là une conclusion précipitée : des expériences ultérieures ont établi que la direction des cristaux dans le champ magnétique dépend plus de la direction du clivage que de celle des des axes optiques, et que la ligne de densité maximum est celle le long de laquelle les forces magnétiques s'exercent avec la plus grande intensité ; en sorte que si une substance est magnétique cette ligne s'oriente axialement, et équatorialement quand la substance est diamagnétique. Ce résultat est parfaitement d'accord avec celui obtenu en opérant sur des corps comprimés.

Ainsi dans les diamagnétiques c'est la ligne de densité maximum qui se dispose équatorialement, et cette ligne renferme dans l'unité de longueur le plus grand nombre de molécules, par conséquent les cristaux diamagnétiques ne se comportent pas autrement que des corps homogènes ayant une forme allongée, dans ceux-ci en effet l'orientation équatoriale appartient à la ligne, rencontrant à l'intérieur du solide le plus grand nombre de molécules.

Concluons donc que la direction d'un corps dans le champ magnétique, varie : 1° selon que la substance est magnétique ou non, et que par suite elle est attirée ou re-

poussée par l'aimant. 2° Elle dépend de l'état de la compression intérieure.

La meilleure façon d'expliquer ces phénomènes, nous paraît être celle que déjà nous avons signalée dans le chapitre précédent. On peut diviser les corps en deux classes, dans les uns les mouvements rotatoires moléculaires peuvent céder à l'action du tourbillon magnétique, dans les autres il n'en est pas ainsi. Les premiers sont nommés magnétiques, et les autres diamagnétiques. Dans ce dernier cas, évidemment, les rotations intérieures éprouveront une grande difficulté à continuer leur mouvement dans le tourbillon magnétique, et naturellement la ligne le long de laquelle ces rotations sont les plus nombreuses se porte là où le mouvement antagoniste est moindre. Aussi, quand les corps sont entièrement libres ils s'éloignent des pôles de l'aimant, et quand ils sont maintenus dans l'espace interpolaire, il se placent de façon à occuper la partie du champ magnétique où l'énergie polaire est minimum, c'est-à-dire équatorialement, d'où la répulsion apparente. De même un corps flottant librement au milieu d'un cours d'eau, se place de façon à offrir la moindre résistance au fluide. Ainsi la ligne suivant laquelle le tourbillon rencontre la plus grande somme de résistance, qui dans une masse figurée homogène est la dimension dominante, et dans une masse comprimée la ligne de plus grande densité, cette ligne se dirige équatorialement.

Considérons le cas d'un corps magnétique, ici la somme des rotations mobiles et qui toutes deviennent parallèles les unes aux autres, comme nous l'avons dit à propos des aimants forcera le solide à se diriger axialement. Les piles de lamelles prendront l'une ou l'autre position suivant que prévaudra l'influence de la densité ou celle de la forme extérieure, mais la première influence en général l'emportera de beaucoup sur la seconde, car elle agira direc-

tement sur les rotations moléculaires et modifiera la mobilité du milieu.

De ces indications théoriques il ressort que le tourbillon circumpolaire d'un aimant est un milieu résistant au sein duquel les mouvements des corps diamagnétiques, sont gênés, fait qui du reste est mis en pleine lumière par les expériences citées à la fin du chapitre précédent. Nous avons vu en effet un disque de cuivre mis en rotation à l'aide d'une manivelle ou un cube de même métal suspendu à un fil fortement tordu et pirouettant sur lui-même, placé entre les pôles d'un électro-aimant, s'arrêter ou tout au moins se mouvoir avec extrême difficulté. Ce frottement virtuel est d'autant plus intense qu'il s'exerce contre des corps offrant un plus libre passage intérieur à l'éther qui constitue le tourbillon magnétique, c'est-à-dire contre des substances bonnes conductrices telles que le cuivre, etc.

La position que prend un solide entre les pôles d'un aimant, est déterminée par la résultante totale des actions magnétiques sur les diverses molécules, mais dans les liquides et dans les gaz, chacune des molécules peut s'orienter librement, et alors on observe une circonstance qui montre que le diamagnétisme est une pure action différentielle, c'est-à-dire qu'une substance magnétique peut sembler diamagnétique si elle est moins magnétique que le milieu dans lequel elle est plongée, de même que les corps pesants s'éloignent de la surface de la terre, quand ils pèsent moins, à égal volume, que le milieu environnant : ainsi le principe des pressions différentielles, ou principe d'Archimède, trouve encore son application dans les phénomènes magnétiques. Cette remarque est d'une grande importance, car elle indique l'existence autour des aimants d'une pression continue engendrée par le mouvement magnétique et confirme ce que nous avons dit de l'action des aimants, lorsque nous l'avons expliquée par

le mouvement d'un fluide qui entraîne le corps dans le sens où le tourbillon a la moindre activité.

Mais ces rotations moléculaires auxquelles nous attribuons une importance si considérable, ont-elles lieu réellement? avons-nous quelque preuve de leur existence à l'intérieur des corps? La réponse est très-simple : de preuves directes aucune, car ces rotations ne peuvent ni se voir ni se toucher, mais les preuves indirectes abondent et cela suffit, car qui ne veut accepter que des démonstrations directes et palpables, doit renoncer à l'étude de la philosophie naturelle. Ampère accueillit avec grande joie la découverte de Seebeck, car le nouveau moyen de développer l'électricité par la chaleur montrait la possibilité dans des circuits entièrement métalliques de courants semblables à ceux qu'il admettait autour des particules des aimants[1]. Aujourd'hui les expériences de Faraday, cet habile et infatigable observateur, nous ont fourni des preuves bien autrement concluantes.

Disposant (fig. 23) un parallélipipède *c* de verre pesant ou de verre ordinaire entre les pôles d'un très-fort électro-aimant MN de façon à le faire traverser suivant la ligne des pôles *ab* par un rayon de lumière polarisé[2], il observa une déviation du plan de polarisation dans le sens que présenteraient les courants d'Ampère que l'on peut imaginer dans un fer doux placé entre les pôles de l'électro-aimant. L'expérience réussit plus difficilement avec les corps cristallisés : cependant elle donne des résultats positifs, et il en est de même avec tous les autres corps trans-

[1] *Recueil*, etc., p. 378.

[2] Les électro-aimants MN sont fixés à deux chariots *o* et *o'* mobiles sur un support *k*. — Le courant est introduit dans les bobines par les fils A *e g* B, à l'aide du commutateur H. En *b* et en *a* sont deux prismes de Nicol : le premier servant de polariseur, le second d'analyseur. A l'aide d'une alidade, ce dernier tourne au centre d'un cercle gradué de façon à permettre d'apprécier la déviation du plan de polarisation.

parents solides ou liquides, seulement la déviation est plus ou moins prononcée.

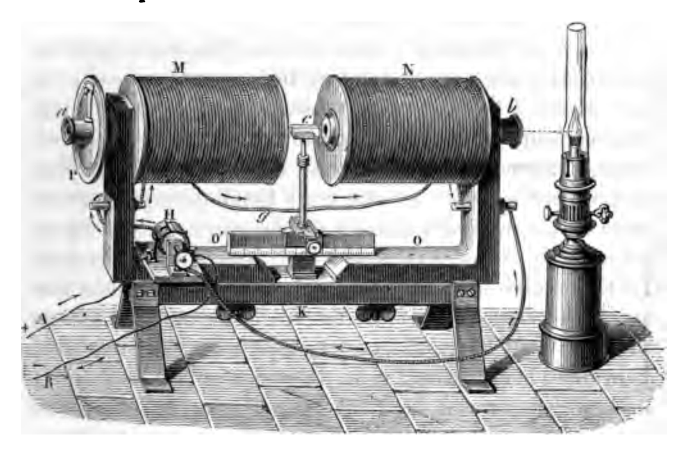


Fig. 54.

Une telle propriété est analogue à celle que présente le quartz mais il y a des différences qu'il faut examiner. Nous avons déjà fait connaître l'explication ingénieuse qu'en avait donnée Fresnel en montrant que cela était dû à un dédoublement du rayon lumineux. Le rayon simple à l'entrée se dédouble à l'intérieur du cristal, et les vibrations qui constituent les nouveaux rayons ne sont pas rectilignes mais circulaires et de sens opposé dans chacun d'eux. Fresnel parvint à isoler les deux rayons au moyen d'un ingénieux système de prismes et à démontrer que l'un et l'autre étaient polarisés circulairement comme cela arrive dans la réflexion totale à l'intérieur de certains prismes de verre. Enfin il prouva que la déviation du plan de polarisation dans les lames de faible épaisseur résultait de la recomposition de deux vibrations circulaires l'une dextrorsum et l'autre sinistrorsum en une vibration unique

rectiligne et que l'angle de déviation dépendait du retard relatif de l'un des deux rayons qui ne traverse pas le cristal avec la même vitesse.

On a constaté que le pouvoir de faire tourner le plan de polarisation n'appartenait pas exclusivement au quartz, et que diverses substances le possédaient également : tels sont certains liquides, comme le sirop de sucre, la dextrine, l'essence de térébenthine, qui dévie encore le plan de polarisation alors qu'elle est à l'état de vapeur. Il résulte de là que l'effet produit par les corps sur le plan de polarisation est dû à l'une des deux influences suivantes: l'action individuelle des molécules et l'arrangement des molécules dans la structure du solide. Le premier cas se présente dans les liquides et la vapeur d'essence de térébenthine ; le second est celui du quartz qui est dextrogyre ou lævogyre, suivant les faces de la figure plagiédrique, et qui perd toute action en perdant sa structure cristalline, si bien que la silice fondue est inerte. Dans les liquides, on n'a pas encore réussi à séparer les rayons comme dans le quartz.

Enfin il est une troisième condition qui peut donner aux substances le pouvoir rotatoire; c'est le magnétisme. Mais ce genre d'action est caractérisé par une circonstance essentiellement différente. Avec les substances nommées cidessus, la rotation se fait dans une direction toujours la même par rapport à la direction du rayon transmis, de telle façon qu'elle reste la même quand on retourne la lame active face pour face. Il arrive ici ce qui se passe lorsque, tenant une vis à la main, on en regarde soit une extrémité, soit l'autre, on voit le filet s'enrouler toujours dans le même sens autour de l'axe. Par conséquent, si un rayon traverse une lame de substance à polarisation rotatoire deux fois en sens contraire, par exemple une première fois de *a* en *b*, puis une seconde fois après avoir éprouvé une réflexion de *b*

en a, la rotation est nulle, ce qui est facile à vérifier dans le quartz.

Au contraire, dans le cas du pouvoir rotatoire causé par le magnétisme, la déviation ne dépend pas de la position de la plaque, mais de celle de l'aimant. La rotation se fait à gauche quand le pôle sud est tourné vers l'observateur, et se fait vers la droite de l'observateur, alors que le pôle nord est le plus voisin de lui. Ce renversement de la rotation du plan de polarisation est facile à obtenir à l'aide d'un électro-aimant, car il suffit de changer le sens du courant. Lorsque, soumettant une substance transparente à l'action d'un aimant, on fait passer un rayon plusieurs fois à travers la plaque, la déviation du plan de polarisation augmente de plus en plus.

Cette différence montre que les phénomènes n'ont pas exactement la même origine. En effet, il est deux manières de concevoir comment les deux spirales, l'une dextrorsum et l'autre sinistrorsum, en lesquelles se divise le rayon lumineux à l'entrée, arrivent à se superposer à la sortie avec une différence de phase et d'angle de rotation.

La première consiste à faire marcher moins vite, comme l'on dit, un des deux rayons; alors, au moment de la sortie, tandis que l'un des rayons effectue n tours durant son trajet au travers de la substance, l'autre est resté dans le corps transparent, pendant n tours, plus ou moins un arc d'un certain nombre de degrés; à ce mouvement a participé solidairement toute la spirale qui marche plus ou moins vite pendant que chaque molécule fait son tour dans un temps toujours le même.

La seconde manière d'envisager les choses, est de supposer les molécules marchant dans leurs orbites avec des vitesses giratoires différentes sur les deux rayons, et ainsi l'un des rayons fait une circonférence pendant que l'autre en fait une plus une fraction de degré, de telle sorte qu'après n tours il y aura une différence de phase, comme

dans le premier cas, mais alors sans séparation des rayons.

Le quartz étant biréfringent, à l'intérieur de ce cristal nécessairement les deux rayons marchent avec une vitesse de propagation différente; par suite la première hypothèse lui convient exactement, car de là résulte que, si la marche d'un rayon s'accélère, quand il va de droite à gauche, elle se ralentira d'autant, lorsqu'il ira de gauche à droite.

Mais dans la déviation du plan de polarisation par le magnétisme, on n'est pas encore parvenu à mettre en évidence la double réfraction du rayon, par conséquent l'accélération ou le retard du rayon doit être expliqué d'après la seconde hypothèse citée tout à l'heure. Et même il n'y a que ce moyen d'expliquer comment la marche du rayon est accélérée aussi bien pendant l'aller que pendant le retour; car, seulement dans le second des deux cas admis comme possibles, les rotations sont indépendantes du sens de la translation de l'onde, et ne changent pas, le sens de la gyration restant le même, que l'onde aille de a vers b ou de b vers a. Cela posé, la déviation du plan d'un rayon polarisé s'explique parce que, à l'intérieur des corps soumis au magnétisme, le rayon lumineux ne reste pas linéaire dans le premier plan de polarisation; mais, rencontrant un milieu où l'influence de l'aimant développe des rotations en deux sens opposés, il se propage par vibrations circulaires, et celles qui marchent *suivant* le tourbillon magnétique sont *accélérées*, et celles qui le contrarient sont *retardées*.

La rotation du plan de polarisation est toujours assez faible; elle atteint 12° à 13° pour un trajet d'environ un pouce lorsqu'on emploie des aimants fort puissants. Cela prouve que l'accélération du mouvement hélicoïdal de l'atome lumineux produite par l'action magnétique est une fraction extrêmement petite de la vitesse qui anime l'atome

lui-même[1]. On a ainsi une idée de la vitesse du tourbillon par rapport à celle des vibrations lumineuses circulaires, et on voit combien le mouvement éthéré magnétique est plus lent que celui qui constitue la lumière.

Par conséquent, à l'intérieur des aimants, les mouvements éthérés venus du dehors se transforment en mouvements circulaires. En confirmation de ceci il faut rappeler l'explication que donna Ampère de la rotation des aimants par les courants. Il démontra que lorsqu'on fait passer un courant à travers le corps d'un aimant en équilibre au milieu d'un bain mercuriel, la portion rectiligne du courant qui parcourt le barreau est comme si elle n'existait pas, c'est-à-dire *comme si l'on avait supprimé cette portion du circuit total*[2]. Il faut donc dire que le mouvement rectiligne du courant, se résolvant en une accélération des rotations moléculaires, devient circulaire à l'intérieur de l'aimant, de même que quelquefois l'oscillation rectiligne de la lumière se change en vibration circulaire.

Toutes les substances diamagnétiques font tourner le plan de polarisation dans le sens du courant; mais il y a quelques corps magnétiques, comme le chorure de titane et certaines dissolutions salines, qui impriment à ce plan une rotation contraire. Par exemple, le chlorure de fer a une force rotatoire 6 à 7 fois plus grande que l'action diamagnétique de l'eau. Ce fait vient appuyer l'opinion la plus accréditée parmi les physiciens, que le tourbillon n'agit pas sur les molécules lumineuses d'une façon directe, mais seulement médiatement, parce qu'il modifie la ma-

[1] Supposant une déviation de 20° pour 25 millimètres, l'avance d'un des rayons sera 10° et le retard de l'autre 10°, et comme sur cette longuenr il se fait environ 4 millions d'ondes lumineuses jaunes, l'avance se réduit, tout calcul fait, à être un peu moins de 1/100 de seconde par tour de spire de l'orbite hélicoïdale du rayon.

[2] Ampère, *Recueil*, p. 369.

tière pesante. Il en est de même des recherches de Delarive et Verdet, qui ont prouvé que la rotation n'est pas proportionnelle au pouvoir réfringent de la substance, mais à son poids spécifique. La rotation négative exercée par les corps magnétiques est une exception curieuse ; cependant elle peut s'expliquer en disant que, dans ces substances, une notable partie des rotations intérieures étant magnétiques, ces mouvements sont moins fortement accélérés par le tourbillon magnétique que ceux de sens contraire, parce que, possédant déjà en partie la vitesse du tourbillon, ce dernier ne peut leur communiquer le même accroissement qu'aux autres; par suite, l'influence dominante s'exerce sur les rotations contraires qui, par la résistance plus grande qu'elles opposent, reçoivent une accélération relativement plus marquée, et ainsi l'effet final sera celui qui convient à celles-ci.

Avec les substances diamagnétiques, la déviation du rayon a été trouvée proportionnelle à l'intensité de la force magnétique employée; et pour les directions obliques, on a reconnu qu'elle variait en raison directe de la composante magnétique et en raison inverse du carré des distances comme toutes les autres actions. Le pouvoir rotatoire d'une substance dépend de la compression (Matteucci), et de tout ce qui peut altérer la liberté des molécules. Ainsi, il augmente quand on rend les mouvements moléculaires plus faciles; par exemple, la rotation des différentes espèces de verres croît lorsqu'on les chauffe et s'affaiblit quand on les comprime. Telle est encore la raison de la très-faible intensité de la puissance rotatoire que présentent les corps cristallins, spécialement ceux de formes très-compliquées. Les récents travaux de Verdet ont démontré que pour ces rotations n'a pas lieu la loi trouvée pour les autres, d'être en rapport inverse du carré de la longueur d'onde [1]. De là une nouvelle raison d'admettre que les deux genres de mouvements rotatoires n'ont pas

la même origine et ne s'accomplissent pas suivant le même mécanisme.

Malgré les nombreuses recherches entreprises sur cette question intéressante, il reste encore beaucoup à faire. Le diamagnétisme est d'une observation délicate; en outre, la difficulté que l'on éprouve à se procurer des substances pures, de structure homogène et de forme régulière, est un obstacle sérieux à l'établissement d'une théorie générale. Toutefois il résulte clairement des faits exposés ci-dessus que :

1° Le magnétisme est réellement un agent dont l'action s'exerce sur tous les corps.

2° Les rotations intérieures admises dans les aimants existent aussi dans les autres corps, avec cette différence que, dans un très-grand nombre, ils n'ont pas une mobilité suffisante pour s'orienter dans le sens du tourbillon magnétique du fer, quoique cependant ils n'échappent pas à son influence.

3° Le diamagnétisme n'est pas une force spéciale, mais un simple effet de la résistance qu'éprouvent les mouvements giratoires des molécules au milieu du tourbillon magnétique.

C'est le nombre et la distance relative des molécules qui déterminent la position d'un corps dans le champ magnétique : autrement dit, cette direction se règle sur celle de la ligne de plus grande densité, et celle-ci se place axialement lorsque les courants des molécules présentent une grande mobilité et une orientation facile, tandis qu'elle est repoussée là où la résistance est minimum, quand les rotations intérieures ne sont pas susceptibles de s'orienter.

4° En général, les rotations magnétiques sont plus lentes que les mouvements circulaires auxquels en optique on attribue la déviation du plan de polarisation. Elles consistent sans doute en tourbillons comprenant un grand nombre de molécules, de telle sorte que ces mouvements circula-

toires sont assez étendus relativement aux petits tourbillons des molécules. Ceux-ci dès lors se comportent comme s'ils étaient immergés dans des courants rectilignes, et par suite, suivant leur forme, les molécules tournant en sens contraire du tourbillon magnétique, leur mouvement peut être accéléré. Telle est la conception qui permet d'embrasser dans un même ensemble le nombre considérable des faits connus jusqu'à présent. Il se trouve, à la vérité, quelques observations peu concordantes avec les autres, mais aucune d'elles ne paraît contredire le principe fondamental.

5° C'est peut-être par ces mouvements circulatoires que se propage le courant dans les corps magnétiques : cela du moins semble indiqué par les phénomènes optiques et par les observations d'Ampère relatives à la rotation continue d'un aimant sous l'influence d'un courant. Cet habile physicien a démontré que, dans ces circonstances, la portion rectiligne de courant qui fait corps avec le cylindre aimanté est comme si elle était supprimée du circuit total ; il faut donc que le mouvement de l'éther devienne circulaire à l'intérieur du barreau, car le calcul permet d'établir que sans ce mouvement circulaire la rotation du barreau ne saurait avoir lieu.

Des faits exposés dans ce chapitre il ressort une autre conséquence : c'est que les prétendues actions à distance se réduisent à des actions qui s'exercent par l'intermédiaire d'un milieu environnant. En effet, combien d'actions diverses, toutes extraordinaires dans leur manière d'agir, ne devrait-on pas imaginer pour expliquer les phénomènes si variés du diamagnétisme? Le cas d'un corps magnétique plongé dans un milieu plus magnétique correspondrait au cas d'une force qui, attractive jusqu'à une certaine distance, deviendrait ensuite répulsive. L'action sur le cube de cuivre tournant ne saurait être seulement attractive, il faudrait de plus la supposer révolutive, car la neutralisa-

tion de l'effet de torsion du fil suppose un couple opposé au couple de torsion, ce que ne sauraient produire des forces simplement attractives résultantes de la forme des masses influencées, le cube étant parfaitement symétrique.

La rotation du plan de la lumière polarisée serait attribuée à une force révolutive spéciale, mais alors on serait forcé de la considérer comme variant avec la nature des substances, puisque celles-ci tournent à droite, celles-là à gauche, et ainsi de suite.

Si l'on éprouve quelqne peine à expliquer les phénomènes de diamagnétisme par des mouvements spéciaux de l'éther, les mêmes difficultés se présentent quand on leur donne pour cause des forces abstraites; et comme dans ce cas il faut imaginer des forces ayant des propriétés exceptionnelles et même contradictoires, cette seule considération suffirait pour nous faire repousser toute théorie de ce genre.

C'est donc avec raison que, dès les premières lignes de cet article, nous avons affirmé que le magnétisme est rangé aujourd'hui parmi les forces cosmiques, puisqu'il n'est aucun corps qui échappe à son action. Si, en outre, on se rappelle ce que nous avons dit de la grande quantité d'électricité mise en mouvement par le déplacement des métaux en présence de l'aimant terrestre, on comprendra qu'une telle action ne doit pas être négligée lorsqu'on parle des phénomènes moléculaires et surtout de la gravitation. Peut-être les particularités présentées par les comètes, les répulsions que l'on observe entre les éléments de leurs queues et de leurs chevelures ont une origine diamagnétique. Qui sait encore si les différences constatées par Baily, lorsque, répétant l'expérience de Cavendish, il introduit dans la balance de torsion des balles de substances diverses[1], ne sont pas dues au magnétisme?

[1] Voy. *Mémoires de la Soc. astr. de Londres*, vol. XIV, p. 78.

Et à cela rien d'étonnant, puisque aujourd'hui le magnétisme occupe le premier rang parmi les forces planétaires. Des observations nombreuses prouvent que ce n'est pas une propriété spéciale à la Terre; ainsi, certains aérolithes sont magnétiques. D'après les travaux de Kreil, Sabine, Bache et autres, la Lune influencerait les magnétomètres et son action varierait avec l'angle horaire de notre satellite. Le magnétisme solaire n'est pas encore un fait démontré; mais il est certain que cet astre agit sur la Terre comme un aimant, soit directement, soit indirectement. Le synchronisme de la période décennale des taches solaires et de la période des fluctuations magnétiques met hors de doute l'influence que les variations de l'astre central exercent sur les planètes par l'intermédiaire de l'agent magnétique, tandis que jusqu'ici on avait pensé que la gravitation était la seule force émanée du centre de notre système cosmique et exerçant son action à travers l'espace.

Il n'est donc point absurde d'admettre dans l'espace céleste un milieu en mouvement capable de transmettre l'action des astres; ce mouvement diffère de la vibration qui constitue lumière et chaleur, et nous n'hésitons pas à le nommer tourbillon, malgré le ridicule attaché à ce mot. Les astres, comme les aimants, sont enveloppés chacun d'un tourbillon; seulement, dans ceux-ci, vu leurs faibles dimensions, l'influence magnétique devient insensible à une distance très-faible. Ces tourbillons sont formés par des rotations d'une étendue très-restreinte, et même par une translation circulaire de l'éther, effet qui peut être le résultat des mouvements vibratoires, comme Ampère l'a montré pour les aimants. Enfin rien ne s'oppose à ce qu'une partie du tourbillon soit animée de translation, et Fresnel lui-même admettait que la terre emporte avec elle une partie de l'éther environnant, idée qui a été confirmée par de récentes expériences d'optique.

CHAPITRE XV

RÉCAPITULATION ET CONCLUSIONS.

La longueur et la difficulté du sujet traité dans ce livre nous oblige à grouper devant les yeux du lecteur les idées exposées dans les chapitres précédents et à lui faire bien saisir la filiation des raisonnements qui ont motivé nos conclusions; car, à diverses reprises, il nous a fallu interrompre le cours régulier de la démonstration générale pour traiter divers cas particuliers.

En électricité, plus que dans les autres branches de la physique, les lacunes sont nombreuses, et malgré notre préoccupation constante de ne point perdre de vue les faits, en leur absence force a été d'invoquer les analogies et de chercher les hypothèses les plus probables. Aussi, de nos conclusions, les unes seront acceptées sans conteste, car elles ne s'écartent pas des idées reçues; mais nous ne nous faisons pas illusion jusqu'à croire qu'il en sera de même pour toutes les autres; cependant nous espérons que même celles-là ne seront pas rejetées sans examen, et peut-être leur discussion mettra-t-elle sur la voie de la vérité. Cela dit, résumons notre thèse.

L'ensemble des phénomènes appelés habituellement électriques nous révèle l'existence dans la nature d'une force expansive que développent toutes les actions capables de troubler le régime moléculaire des corps, qu'elles soient mécaniques, chimiques, calorifiques ou magnétiques. Cette force revêt deux modalités bien distinctes : à l'état de *tension*, elle se manifeste par l'attraction et la répulsion des corps légers; sa présence à l'état de *courant* est décelée par la décomposition chimique et les mouve-

ments des aiguilles aimantées, les secousses physiologiques, l'échauffement des conducteurs, etc., etc.

Dans ce troisième livre, notre but a été de trouver quelle pouvait être la nature des phénomènes électriques, et à telle fin nous nous sommes adressés à la pile de Volta, comme étant l'appareil qui permet d'étudier avec la plus grande facilité l'agent électrique dans ses deux conditions. La comparaison des relations observées dans ces deux états nous a appris qu'ils sont toujours *corrélatifs*, et que l'un cesse quand l'autre commence. D'où il suit que *l'agent mis en mouvement est unique, mais qu'il se traduit au dehors par deux séries d'effets différents*. Les propriétés des conducteurs qui, réunissant les pôles d'une pile, sont évaluées par la force électrique, nous prouvent qu'elle ne siége pas seulement à la surface, mais qu'elle pénètre à l'intérieur des corps, et que souvent elle les désagrége mécaniquement ou les décompose chimiquement. Dans tous ces effets apparaît une *direction déterminée de l'action*, qui se distingue ainsi des simples influences exercées sur les corps légers et des simples mouvements oscillatoires. En outre, quand les conducteurs sont envahis par l'électricité et placés dans des conditions convenables de mobilité, ils ont la propriété de surmonter une résistance incessamment renouvelée, de vaincre des frottements ; par conséquent ils sont animés d'une force vive qui restitue au système la quantité de mouvement détruite par la résistance; en un mot, il *se produit un véritable travail*. On ne peut donc faire de l'électricité dite de *courant* une force statique dépendante soit d'un simple équilibre de fluide, soit de forces tendant vers des centres fixes, comme le sont les orientations dues à la polarité; mais on doit l'envisager comme une *condition dynamique* capable de fournir la force vive nécessaire à l'accomplissement d'un travail continu mécanique, thermique ou chimique.

Ainsi caractérisée, la cause des phénomènes électriques

se trouve être un agent parfaitement distinct de ceux étudiés dans les deux premiers livres. La pile devient une machine en activité qui accomplit un véritable travail.

Or, dans tout système mécanique de ce genre, deux *éléments* sont à considérer : 1° la source de l'action, c'est-à-dire le principe générateur de la force vive; 2° la manière dont se transmet cette force d'un point à l'autre.

La première est facile à trouver, c'est l'altération chimique des matériaux qui constituent l'électro-moteur : dans celui-ci les métaux s'oxydent, de sorte qu'une pile produit le travail en *brûlant* du zinc, comme une machine à feu ordinaire le produit en brûlant du charbon. Ainsi il est facile de comparer cette force à une autre force plus connue, mais il faut expliquer à son tour les circonstances qui accompagnent cette combustion dans la pile, bien différentes de celles de la combustion ordinaire.

Il est moins aisé d'avoir une notion claire du deuxième élément, le mode de transmission.

Dès les premières découvertes sur la pile, les physiciens admirent une matière en mouvement. C'est en effet l'idée qui se présente spontanément à l'esprit; mais cette première conception était vague, mal définie, et il était nécessaire que les faits vinssent en donner une interprétation précise. Ce mouvement est-il de vibration ou de translation : est-il analogue à celui qui constitue la chaleur, ou bien est-il un transport de fluide? Et dans ce cas, le fluide est-il la matière pesante très-atténuée, mais conservant toutes les propriétés de la matière ordinaire? ou bien est-ce quelque autre matière subtile qui entre comme élément dans la constitution de tous les corps, par exemple, celle dont les phénomènes lumineux nous ont révélé l'existence?

Lorsqu'on étudie d'une façon comparative les propriétés des vibrations et celles du courant, on reconnaît bien vite que le mouvement qui anime les conducteurs interpo-

laires d'une pile n'est pas une simple vibration thermique; s'il en était ainsi, les relations entre l'effet thermométrique d'un courant et son intensité seraient toutes différentes de celles fournies par l'observation, et en particulier la température ne varierait pas en raison du carré de la section. Bien au contraire, l'expérience directe a prouvé que le courant obéit aux lois de tous les fluides en mouvement et satisfait à l'équation de continuité, c'est-à-dire que sa vitesse est inversement proportionnelle à la section. Par conséquent, ce que l'on appelle *courant*, *consiste en un véritable flux de matière dans l'intérieur des conducteurs*, et le mot courant est une expression heureuse, car elle représente exactement le phénoméne.

Reste à savoir si le flux est constitué par la matière pesante ou par une autre plus subtile. Un examen superficiel des phénomènes qui accompagnent les décharges de fortes tensions éclatant au milieu de l'air, ou dans les milieux raréfiés, ou à travers un solide, ont porté quelques physiciens à tout attribuer à une affection spéciale de la matière pondérable, car pendant ces décharges il y a toujours transport de parcelles solides. Mais si l'on examine les choses de plus près, on voit que ces parcelles sont détachées de la surface seulement; et, lorsque des conducteurs de nature différente sont réunis les uns à la suite des autres, on ne trouve jamais la matière de l'un entraînée dans l'intérieur de celui qui vient après. Il est naturel de conclure de là que le transport de particules pesantes est dû à l'action expansive du courant, que la matière pondérable est passive, qu'elle favorise la décharge, mais n'en est pas la cause efficiente.

Il est encore une autre observation à faire ici. Puisque le courant ne consiste pas en une vibration interne du conducteur, comme cela est prouvé pour le calorique, mais en un véritable transport, autrement dit en un flux, il serait nécessaire d'admettre que, malgré leur cohésion, les

particules constitutives des conducteurs pussent, au moins en partie, changer de place et se transporter avec l'immense vitesse qui caractérise le mouvement électrique.

On se demande alors comment la matière pesante acquiert une aussi prodigieuse mobilité et une aussi grande activité ; comment, sous l'action de forces très-faibles, elle peut s'élancer dans les conducteurs et les parcourir sur une longueur énorme, malgré la résistance qu'ils lui opposent. Cela n'est explicable que par l'une des deux hypothèses suivantes : ou la matière pesante en circulation dans les conducteurs est tellement atténuée que pour elle les obstacles n'existent pas, de sorte qu'ainsi elle ne présente plus les propriétés de la matière grossière, et qu'il est impossible de la reconnaître à ses caractères physiques et chimiques ; ou bien la substance qui entre en mouvement est extrêmement mobile et fluide, comme celle qui constitue l'éther, et c'est elle qui ébranle la matière pondérable. La première partie de cette proposition ne sera certainement pas acceptée par les adversaires de la théorie éthérée, pour lesquels les phénomènes électriques sont de simples affections de la matière pesante dans son état ordinaire, et qui conserve toujours et partout ses divers attributs. Du reste, si on admettait cette transformation, elle serait contredite par les faits, car les particules transportées conservent leur nature chimique, et de plus, dès l'instant où l'on supposerait la matière se modifiant de façon à permettre de tout expliquer et à éviter toutes les difficultés, cette hypothèse ne différerait pas essentiellement de la seconde, parce que la matière subtile nommée éther n'est autre que la matière ordinaire à son état de simplicité atomique. On arrive donc par voie d'exclusion à attribuer les faits observés au mouvement d'une matière très-subtile que l'on nomme éther, pour simplifier le langage.

Tous les phénomènes de transport opérés par l'électricité mettent en évidence deux grandes vérités : 1° le cou-

rant est un flux de sens défini, il circule du pôle positif au pôle négatif; 2° il n'est point nécessaire d'admettre deux courants contraires, attendu que les faits cités comme établissant l'existence du courant négatif sont explicables par l'effort expansif de l'électricité, dont l'intensité subit un accroissement notable aux extrémités libres des deux corps qui se déchargent. Il faut excepter les cas dans lesquels, pendant les volatilisations, survient une décomposition chimique, parce qu'alors les transports peuvent se faire aux pôles opposés, comme dans la décomposition des liquides.

Les différences d'éclat et de température que présentent les pôles dans les décharges discontinues viennent à l'appui de nos conclusions. En effet, au pôle positif, d'où sort le courant, on a la plus grande intensité de vibrations et une lumière plus vive; mais en même temps, la force vive calorifique étant absorbée par la volatilisation, ce même pôle s'échauffe moins, tandis que, par contre, au pôle négatif, où s'accumule la matière transportée et où en quelque sorte elle se condense, la température s'élève beaucoup, mais la lumière est moindre, et les masses mises en mouvement sont en raison inverse des vitesses[1].

La meilleure façon de nous éclairer sur la nature du courant, c'est d'en étudier l'origine; aussi avons-nous traité ce sujet d'une manière assez étendue. Si nous laissons de côté pour un moment les actions mécaniques et magnétiques, nous pouvons dire que l'action chimique et l'action thermique sont les deux sources principales du courant. Dans une pile voltaïque, le flux électrique dérive tout entier des réactions chimiques intérieures, et aussi variés que soient les travaux extérieurs, leur somme n'est jamais supérieure à celle des travaux qui ont lieu au dedans de l'électromoteur, et la somme des deux ne surpasse

[1] Voy. Stokes, *Philos. trans.*, 1862, p. 619.

jamais celle que produirait directement l'altération chimique des éléments qui engendrent le courant.

Lorsque, dans le circuit, aux effets chimiques s'en ajoutent d'autres d'espèce différente, mécaniques ou calorifiques, en les ramenant tous à un même genre, ce qui se fait par un calcul le plus souvent facile, connaissant les coefficients ou équivalents de transformation, on reconnaît qu'il y a constamment équivalence parfaite entre les forces vives extérieures et intérieures. La force ne se crée pas, et ne se tire jamais de rien; mais par l'intermédiaire de cet impondérable elle se métamorphose incessamment, tout se réduit à un mouvement qui se change en un autre, avec équivalence complète de force vive. En d'autres termes, le mouvement moléculaire chimique se change en mouvement thermique ou mécanique, de même qu'il en arrive à la chaleur du foyer d'un moteur à vapeur. De cette façon, la théorie de la pile se trouve ramenée à celle des machines à l'aide desquelles on transforme la force vive en travail.

Il n'est pas toujours facile d'évaluer les divers travaux que la pile accomplit, aussi trouve-t-on fréquemment qu'il y a disparition d'une certaine quantité de calorique employée on ne sait à quoi, tant on est loin de produire avec elle la force gratis. Parmi ces travaux qui passent inaperçus se trouve celui dont l'effet est de changer la direction des circuits moléculaires, leur arrangement et la cohésion des corps, et le refroidissement qui accompagne quelquefois le passage du courant montre combien il faut ne pas se hâter de croire que l'on connaît tous les travaux accomplis par le mouvement électrique.

Dans toutes les dispositions voltaïques il se passe un fait d'une grande importance et très-propre à nous éclairer sur la nature du courant. L'action chimique déterminée par l'affinité des corps mis en présence se manifeste par la tension polaire des deux extrémités de la pile; mais cette

action, dans certaines combinaisons, ne peut poursuivre son effet, si l'on ne met pas les deux métaux hétérogènes en contact à l'aide d'un arc conducteur. De plus, au moyen de ce circuit, on peut régler la quantité d'action et même l'enrayer complétement. D'où il résulte que : 1° les décompositions sont l'effet d'une tension statique se développant même dans les liquides qui de leur nature sont ou isolants ou mauvais conducteurs; et s'ils conduisent, ils le font précisément parce qu'ils se décomposent; 2° que dans ces circonstances l'action chimique se produit à la condition qu'il y ait transport de quelque chose à travers le fil. Lors donc qne ce quelque chose manque, la décomposition des corps destinés à réagir les uns sur les autres ne peut avoir lieu, et pas davantage la formation d'un nouveau système d'équilibre intérieur des molécules, soit pour faire une analyse, soit pour faire un autre composé. Mais puisque ce qui traverse le fil interpolaire n'est pas un simple mouvement oscillatoire, et présente au contraire tous les caractères d'un flux, il faut admettre qu'il y a là transport de quelque substance. Or ce n'est pas la matière pondérable, car les réactions auxquelles elle prend part sont localisées dans la partie du circuit comprise entre les rhéophores ainsi que le prouve l'équivalence chimique des quantités décomposées ; donc par voie d'exclusion on arrive à dire que la substance en circulation est impondérable. D'un autre côté, après une réaction chimique la constitution des corps est altérée : et on dit communément qu'ils sont décomposés. De telle sorte qu'il survient des changements d'intensité dans leur pouvoir réfringent, leur densité, leur conductibilité, c'est-à-dire dans toutes les propriétés que les phénomènes optiques nous ont appris être dépendantes d'un changement du régime de l'éther intérieur. Par suite, rien de plus rationnel que d'admettre le passage de l'éther dans le fil rhéophore, à l'intérieur duquel il s'écoule comme dans un canal afin de donner naissance à une nou-

velle constitution chimique des corps et à de nouvelles et différentes atmosphères éthérées. Donc l'impondérable en mouvement à l'intérieur du fil interpolaire d'une pile n'est autre que l'éther lumineux renfermé dans tous les corps.

Ajoutons encore que dans l'action chimique de la pile il y a un autre phénomène qui conduit à la même conclusion : c'est le transport des éléments. C'est une action où la *tension* joue un rôle tout son propre. Or on ne peut expliquer pourquoi deux corps sont électrisés avec tension après l'action du courant, sans admettre que l'un est positif par rapport à l'autre, c'est-à-dire avec un excès d'éther, que cet éther excédant lui soit essentiel ou qu'il lui soit accidentel. Ce que nous disons des électrodes doit se dire de chaque couple qui lance dans le conducteur une portion de l'éther qui se dégage des combinaisons chimiques, où chaque élément, en se dissociant, prend un état électrique différent de l'autre.

Ainsi, en analysant les phénomènes de l'électrolyse, on est conduit à admettre un courant éthéré.

Comme confirmation de cette théorie, on peut citer encore d'autres faits, et avant tout le développement des courants thermo-électriques. Toutes les fois qu'une source de chaleur est appliquée à un système de corps hétérogènes elle dilate elle agite la matière pondérable et par suite trouble nécessairement l'équilibre de l'éther, le dilate ; alors prend naissance une circulation dirigée dans un sens ou dans un autre, suivant que le permet la structure intime du corps, telle est l'origine des courants thermo-électriques. Une semblable dilatation de l'éther doit avoir lieu durant les réactions chimiques, à cause du trouble survenant lorsque des masses différentes se réunissent pour former un nouveau composé, et cet effet expansif aide beaucoup au mouvement de l'éther dans la direction que détermine le nouvel état d'équilibre succédant à la combinaison. La fa-

cilité avec laquelle se produisent les courants prouve encore la même chose.

Lorsqu'on voit dans des conditions très-diverses d'aussi faibles influences développer des courants énergiques, il est impossible d'attribuer ces courants au mouvement de la matière pondérable désagrégée, et il faut y voir un transport d'une substance beaucoup plus mobile. Est-il admissible, en effet, que la matière pesante puisse être désagrégée par le retournement d'un fer doux ou d'une spirale en présence d'un aimant? Non certes, et cependant, par cette simple manipulation, des courants électro-magnétiques très-intenses sont développés. Ces courants consistent donc en un mouvement d'une matière préalablement très-atténuée, autrement dit d'un fluide qui toujours accompagne la matière grossière.

La notion la plus nette qu'on puisse se former de la genèse du courant est la suivante. Toute cause qui trouble la constitution moléculaire, soit lorsque les corps mêlés les uns avec les autres se combinent chimiquement, soit lorsqu'ils subissent une modification thermique, mécanique ou autre, trouble du même coup l'équilibre de l'éther intérieur. Ce peut être une variation du volume ou de la densité, ou encore de la masse de l'éther intra-moléculaire, comme cela arrive au moment d'une combinaison. Le régime éthéré se trouve ainsi modifié, une nouvelle distribution a lieu dans chaque molécule du corps, et par suite une partie de l'impondérable passe dans le fil conjonctif qui joue le rôle d'un canal de décharge. L'éther mis en mouvement possède nécessairement une partie de la force vive qui l'a ébranlé, et transporte cette même force vive, et devient par là capable d'agir contre les obstacles qu'il rencontre, soit en agitant les masses jusqu'à les rendre incandescentes ou les volatiliser, soit en détruisant les groupes chimiques, et ce dernier travail s'exécute le plus souvent par le même mécanisme qu'une dissociation par voie calorifique. Si on

nous demande quelle est la cause première qui pousse ce courant, nous dirons que c'est la même qui produit l'action chimique.

Par conséquent, la force vive excitée dans une section du circuit par voie chimique, thermique ou mécanique, par le moyen de l'éther circulant, se transmet à une autre section sous l'une ou l'autre des mêmes formes de mouvement d'après la disposition donnée à cette section; c'est l'éther qui est le véhicule de cette action et qui joue ainsi le rôle de la vapeur dans les machines à feu, lesquelles, suivant leur disposition, servent tantôt à mouvoir des masses, tantôt à les désagréger, etc. Envisagé à ce point de vue, le courant rentre dans l'ordre des agents matériels employés à transformer les forces moléculaires en travail mécanique; sa prétendue immatérialité se trouve réduite à néant, et avec elle toutes les difficultés que soulevait une semblable interprétation des faits.

En résumé, dans l'action électro-motrice il faut distinguer deux choses fondamentales : 1° l'action extérieure qui cause la rupture de l'équilibre; celle-ci est dans la pile l'action chimique ; dans les métaux, la chaleur, ou le magnétisme, ou l'action mécanique dans les isolants; 2° la disposition intérieure qui détermine la direction du flux, et qui dépend de la constitution éthérée des éléments mis en présence.

Mais, dira-t-on peut-être, nous *matérialisons* trop l'agent électrique, en en faisant une espèce de fluide ordinaire, tandis que communément on lui reconnaît des propriétés toutes différentes, et que même il est considéré par beaucoup comme une *force*. A quoi nous répondrons que nous ne craignons jamais de suivre les faits jusqu'où ils nous conduisent. Si l'éther est une matière, pourquoi échapperait-il aux lois mécaniques de la matière? Pour ceux qui font de l'électricité une *force*, ils entendent sans doute par

par là un agent immatériel[1], auquel cas, de deux choses l'une, ou c'est une substance d'un ordre de choses en dehors de la matière, ou c'est une fiction de l'imagination. Pour nous, on le sait, force *est cause de mouvement*, et telle est (mais non pas exclusivement) toute matière animée de mouvement, et par cela l'éther en mouvement est une force. Ainsi nous ne nions pas que l'électricité soit une force en avouant sa matérialité.

Sans doute les propriétés toutes spéciales que nous supposons appartenir à l'éther soulèvent quelques difficultés; mais elles ne se rapportent pas au courant, et plutôt à l'état de l'impondérable dans les corps isolants. Ces difficultés sont du reste pareilles à celles qu'on rencontre dans la théorie de la lumière : chose facile à voir lorsqu'on établit un parallèle entre les deux genres de phénomènes; aussi résumerons-nous les résultats d'une telle comparaison.

Au point de vue de l'électricité, les corps se partagent en deux classes : celle des isolants et celle des conducteurs. Dans la première, on compte les substances diaphanes ou plus généralement celles qui font éprouver à la lumière la polarisation rectiligne; dans la seconde, les métaux, c'est-à-dire les substances qui polarisent la lumière elliptiquement. Une telle relation n'est pas accidentelle. Tandis que les premiers laissent passer les vibrations transversales, ils empêchent les mouvements dans le sens longitudinal; et, au contraire, les autres livrent passage aux mouvements longitudinaux et arrêtent les transversaux, de telle sorte qu'ils sont opaques. Les isolants présentent une imparfaite mobilité

[1] M. Hirn, dont nous admirons justement les beaux travaux sur la chaleur, a imaginé pour les forces des entités qui ne sont ni esprit ni matière, c'est-à-dire quelque chose qu'il nous est impossible de concevoir. Il est regrettable qu'un homme si habile ait introduit dans la science ces nébulosités.

de l'éther dans les divers sens d'où vient leur propriété de se constituer à l'état de tension sous l'influence des agents mécaniques ou chimiques, c'est-à-dire d'accumuler l'éther à leur surface. Les conducteurs dans les mêmes conditions donnent naissance à un courant. Les propriétés de l'éther que renferment les corps de la première classe ne sont donc pas de même ordre que celles de l'éther des corps appartenant à la seconde. D'autre part, il est impossible de soutenir que ce n'est pas le même fluide qui ici s'accumule en *tension* et là se transporte sous forme de *courant*. Si bien que, d'après l'ensemble des faits, ce qui agit, ce n'est ni l'éther seul, ni la matière pesante seule, mais les deux ensemble. Nul corps n'est parfaitement conducteur, et nul n'est parfaitement isolant; seulement dans les uns la mobilité est plus grande que dans les autres. Pour nous représenter les choses, nons avons dit qu'à l'intérieur des isolants ou des diaphanes, l'éther a une constitution semblable à celle qui appartient habituellement aux solides, tandis qu'il a celle d'un fluide à l'intérieur des métaux. Dans le vide absolu, l'éther conserve les mêmes propriétés que dans les diaphanes.

Cette propriété de l'éther dans le vide s'accorde parfaitement avec tout ce que la théorie de la lumière nous a appris relativement à ce milieu. Les vibrations transversales étudiées en optique nous montrent dans l'éther des forces de même nature que celles qui résident dans les diaphanes homogènes. Ainsi, par son mode vibratoire, l'éther se rapproche bien plutôt des solides que des fluides; mais cela ne doit pas être rapporté à un effet de cohésion entre ses atomes. Cela tient à ce que les rotations dont sont animés ses atomes pendant qu'elles se prêtent à la propagation longitudinale du choc pour ce qui regarde la communication du mouvement de couche en couche, obligent, d'autre part, les oscillations des atomes mêmes à s'accomplir transversalement; par suite, la translation linéaire des atomes

ne peut s'accomplir avec une complète liberté dans le sens longitudinal suivant la direction du choc.

Ainsi les travaux entrepris dans deux branches très-éloignées de la physique nous amènent à une conclusion identique relativement à la structure des corps. Les corps sont formés non-seulement par la matière pondérable et sensible, mais aussi par une matière subtile dont la distribution n'est pas la même dans tous, et qui n'a pas une égale mobilité dans les deux classes que nous avons contredistinguées plus haut. C'est cette matière que nous avons nommée éther, c'est elle qui en vibrant donne naissance à la lumière, et qui, en se transportant à travers les conducteurs, produit les courants électriques.

On nous objectera que l'identité de l'électricité et de l'éther lumineux est une hypothèse toute gratuite, que rien n'empêche de regarder la supposition contraire comme étant l'expression de la réalité. Mais alors il serait nécessaire d'admettre un éther lumineux et un éther électrique; or un coup d'œil jeté sur l'ensemble des phénomènes apprend bien vite qu'une semblable distinction est fort peu rationnelle.

Par une heureuse coïncidence, à l'époque où Ampère s'occupait de recherches électro-dynamiques, Fresnel s'illustrait par de belles découvertes en optique, et ces deux grands génies arrivaient, chacun de son côté, par des voies différentes, à conclure que l'éther lumineux ne pouvait être autre que l'électricité [1]. Seulement Ampère, encore sous le joug de la terminologie de Dufay, disait: « Ce fluide est le résultat de la réunion et de la neutralisation des deux fluides électriques. » En faveur de cette assimilation, il faisait valoir comme argument principal que les actions électrique et magnétique s'exercent à travers le vide, et que par suite il est impossible d'admettre un

[1] Ampère, *Recueil*, etc., p. 215.

fluide autre que l'éther lumineux. De plus, à son avis, les propriétés optiques de l'éther expliquaient parfaitement la transmission du magnétisme. En effet, d'après Fresnel, les mouvements excités dans ce fluide s'y propageaient par une sorte de frottement des couches déjà en mouvement sur celles qui ne l'étaient pas encore; or un tel frottement devait déterminer des rotations, et par là les phénomènes électro-magnétiques. « Ces considérations conduisent même, dit Ampère, à admettre l'attraction entre les courants qui vont dans un même sens et la répulsion entre ceux qui sont dirigés en sens contraire[1]. » Cependant on ne connaissait pas encore, ni la polarisation rotatoire magnétique, ni l'induction produite par les courants et les aimants, ni les lois des courants en relation avec la température, phénomènes qui jetèrent une grande lumière sur ce problème.

Les physiciens qui sont venus après Fresnel, admettant les vibrations transversales de l'éther pour la lumière, ont cherché ce que devenait la composante longitudinale du choc, et ils ont rencontré de grandes difficultés. Mais il est évident que celle-ci est employée à la communication même de cette espèce de glissement d'une couche à l'autre dont parle Ampère. Il paraît qu'on a confondu la translation effective des molécules, qui forme l'oscillation ou vibration, avec la pression et la communication du mouvement de tranche en tranche qui peuvent se faire sans mouvement de transport du corps intermédiaire, soit par les propriétés des corps élastiques, comme dans les billes d'ivoire, soit par le moyen des rotations. L'électricité, étant une translation, ne pourra se propager là où se propage la lumière; de là la possibilité des condensations de l'éther.

Nous avons reconnu effectivement l'existence de l'éther

[1] Ampère, *Recueil*, p. 215.

lumineux dans tous les corps, même dans les métaux, ainsi que le prouve leur transparence lorsqu'ils sont réduits en lames minces. Pour ces derniers, il faut admettre que, pris dans une grande épaisseur, ils ne transmettent plus le mouvement transversal, non parce que l'éther manque, mais à cause de leur structure moléculaire spéciale qui ne se prête pas à la propagation de ce genre de vibration. En effet, une feuille mince est parfaitement diaphane; lorsqu'on la comprime, sa masse et sa nature ne changent pas; cependant elle devient opaque, puis reprend sa transparence lorsqu'on la chauffe. Les métaux polarisent la lumière elliptiquement, par réflexion et par transmission; cela ne montre-t-il pas encore une certaine mobilité du milieu, de telle sorte que la réflexion s'accomplit à peu près comme à la surface d'un milieu fluide et mobile (telle est, par exemple, le ricochet d'une pierre lancée sur l'eau) permettant la pénétration partielle d'une des composantes du rayon sous une certaine obliquité, circonstance qui ne se rencontre que dans une proportion tout à fait insensible dans les corps vitreux. Le résultat d'une telle mobilité est l'extinction du mouvement transversal, lequel, dit Fresnel, suppose l'éther extrêmement peu compressible, et même à peu près incompressible[1].

La mobilité de l'éther à l'intérieur des métaux est loin d'être une pure hypothèse; elle est démontrée par leur conductibilité pour la chaleur, laquelle dérive certainement de cette mobilité, par la facilité avec laquelle leurs particules changent de place et conservent la forme qu'on leur fait prendre forcément : preuve que leurs molécules pondérables sont capables de glisser les unes sur les autres sans cesser de rester unies mutuellement. La facilité avec laquelle se déplacent les molécules pesantes n'est pas seulement partagée par l'éther qui les enveloppe, mais elle

[1] Ampère, *Recueil*, p. 215.

doit s'étendre un peu plus loin, de telle sorte que les particules du corps se peuvent décharger très-aisément les unes sur les autres de l'excès d'éther que leur apporte quelquefois une cause extérieure, et *vice versa*, ils peuvent le reprendre lorsqu'au contraire leur quantité naturelle d'éther vient à diminuer. Il arrive alors à ces particules (toutefois sans aucun transport d'éléments chimiques pondérables) ce que nous voyons tous les jours se produire dans les décompositions opérées par la pile, c'est-à-dire que le passage du courant se fait par une suite de décompositions partielles déterminées par l'action extérieure. Un fait intéressant, c'est que la conductibilité d'une substance dépend de sa structure moléculaire, et non de sa nature : ainsi le charbon isole à l'état de diamant et conduit à l'état de graphite; par conséquent, la constitution moléculaire a plus d'influence que la constitution chimique sur ce qui constitue la facilité du mouvement de l'éther à l'intérieur des corps.

L'éther existe donc dans tous les corps et les pénètre tous; seulement il faut admettre qu'il ne présente pas dans tous la même mobilité, et une telle hypothèse est de beaucoup préférable, au point de vue de la simplicité, à celle qui reconnaît l'existence d'un éther lumineux et d'un éther électrique.

Que l'on ne croie pas, du reste, que l'hypothèse de deux éthers fasse disparaître toutes les difficultés ; bien au contraire, elle en soulève de plus sérieuses. Par exemple, il faut admettre que, lorsqu'un corps par sa combinaison avec un autre devient isolant (tel le plomb avec le silice), l'éther électrique mobile dans le métal devient immobile dans la combinaison isolante (le verre), ou bien qu'il s'échappe pour laisser la place à l'éther lumineux.

Il faut encore supposer que, dans tout métal qui se transforme en sel, pénètre une nouvelle quantité d'éther électrique, d'où résulte une rupture d'équilibre dans les

corps environnants, de telle sorte que l'on pourrait avoir de l'électricité négative sans électricité positive, et ainsi de suite... Voilà, certes, des imaginations sur lesquelles il est inutile de s'arrêter, car il suffit de les énoncer pour en faire voir toute l'absurdité.

L'hypothèse d'un éther unique dont la mobilité n'est pas partout la même est donc la plus simple de toutes; et si au moment où elle a été présentée pour la première fois elle paraissait arbitraire, il ne peut en être ainsi maintenant que l'on a vu l'ensemble des faits sur lesquels elle s'appuie.

L'existence d'un milieu universel une fois reconnue expérimentalement, on ne devrait plus éprouver de difficultés à prévoir les effets qu'il peut produire, quand il est en mouvement ou que son état habituel d'équilibre est rompu. Malheureusement, l'imperfection des théories hydro-dynamiques est si grande, qu'il est impossible d'arriver par cette voie à interpréter tous les faits. Aussi Ampère a-t-il préféré prendre exclusivement des faits expérimentaux comme base de calcul, et nous-mêmes, malgré le grand nombre de phénomènes découverts depuis lors, nous sommes obligés, pour rendre compte des phénomènes, de procéder par analogie, et de les comparer à ceux que nous présentent les fluides ordinaires.

De cette façon, on reconnaît bien vite que de grandes ressemblances existent entre ce qui se passe dans les conducteurs de l'électricité et les propriétés des fluides en mouvement : 1° lorsque l'électricité se propage dans des fils télégraphiques d'une grande longueur, l'état initial représente parfaitement ce qui arrive dans les fluides, et par le front de courant qui appartient au flux électrique au moment où il envahit le fil, et par les espèces d'ondes qui succèdent à l'ouverture et à la fermeture du circuit; 2° on retrouve dans le courant le phénomène caractéristique des fluides, qui est le choc exercé par la force vive de la masse en mouvement dans les tuyaux, lequel donne

naissance au coup de bélier qui constituent ici certains phénomènes d'induction. Ces mêmes phénomènes nous font encore rapprocher deux phénomènes complémentaires, la tension et le courant, et par là nous arrivons à comprendre mieux ce qu'est la tension; car, de même que l'arrêt d'un courant liquide donne lieu à une pression se faisant sentir tout d'un coup contre les parois des tubes, de même, toutes les fois que l'on interrompt le courant électrique, on développe une pression électrique qui produit une tension plus grande là où il a condensation d'éther, et une moindre là où il a dilatation : la bobine de Rhumkorff nous donne un exemple frappant de ce fait; 3° enfin d'autres phénomènes de l'induction électro-dynamique ne sont qu'un cas particulier des phénoménes découverts par Venturi touchant la diminution de pression dans les liquides en mouvement et la communication des mouvements latéraux. Au moment où le courant commence, il se fait une diminution de pression dans le conducteur, ce qui oblige l'éther extérieur à prendre un nouvel équilibre et à donner ainsi naissance, au moment qu'il s'établit, à des courants passagers, et au moment où il finit il a le choc en retour.

Ces faits achèvent de prouver la matérialité de l'éther, et la manière très-simple dont ils se déduisent des principes mécaniques qui régissent les mouvement des fluides permettent de ne point faire intervenir ni les polarisations, ni les actions transversales, ni toutes ces forces que l'on imaginait aussitôt que le besoin s'en faisait sentir.

Nous ne nous abusons pas jusqu'au point de croire que l'application des principes d'*hydro-dynamique* soit également facile dans *tous les cas particuliers*, mais nous dirons que les difficultés que l'on rencontre alors sont de l'ordre de celles qui nous arrêtent bien souvent lorsqu'on applique ces mêmes principes aux fluides ordinaires. La science se trouve ainsi débarrassée de cette quantité innombrable de fluides qui par le passé encombraient toutes les branches de

la physique : fluide calorifique, fluide lumineux, fluide électrique positif et électrique négatif; fluides magnétique austral et magnétique boréal, tout cela devient inutile, tout s'explique par le mouvement d'un fluide unique, l'éther.

Et parce que d'illustres physiciens répugnent à admettre l'éther, on ne doit pas en arguer contre l'hypothèse éthérée; car, il faut l'avouer, en science comme en tout, chaque âge a sa mode, et l'aversion que montrent aujourd'hui certains physiciens à admettre un seul fluide, contraste étrangement avec la facilité qu'on mettait, il y a peu de temps, à accepter les fluides, quelque nombreux qu'ils fussent. Du reste, si, pour faire prévaloir une doctrine, il suffisait de l'autorité des hommes remarquables qui l'ont soutenue, nous pourrions citer parmi les défenseurs de la théorie éthérée plusieurs savants dont la réputation ne le cède en rien à celle de ses adversaires[1].

Et il n'y aurait rien d'étonnant à ce que, dans la suite, les mouvements de l'éther nous donnent la raison première d'un grand nombre de phénomènes tout autres que ceux dont ils nous donnent actuellement l'explication. Car un agent répandu partout doit produire des effets extrêmement variés, soit quand il *presse*, soit quand il se *transporte*. Nous avons cherché à expliquer par son intervention les réactions qu'exercent à distance l'un sur l'autre, soit deux corps, lorsqu'à la surface de l'un le fluide est condensé et raréfié sur l'autre, soit deux conducteurs à travers lesquels l'éther est en circulation. En un mot, nous

[1] Outre les travaux bien connus de Lamé, Cauchy et de Verdet sur l'optique, on peut voir ceux de Maxwell qui traitent du magnétisme dans l'hypothèse des petits tourbillons; seulement cet auteur nous semble ajouter une complication inutile en admettant des espèces de cellules formées par le fluide électrique. Tout dernièrement aussi, Tyndall n'a pas hésité à se ranger parmi ceux qui envisagent le courant électrique comme un courant d'éther. Depuis la première édition de cet ouvrage, l'état des opinions est remarquablement changé. Toutefois nous ne croyons pas devoir rien changer au texte primitif.

avons cherché si, au moyen de l'éther, il est possible de rendre compte des attractions et des répulsions électro-statiques et électro-dynamiques.

Quant aux attractions électro-statiques, la question peut être considérée comme résolue indirectement par ce seul fait, que les attractions et les répulsions s'exercent seulement lorsque les corps présentent cet état qui équivaut à la pression, et que les phénomènes d'induction nous montrent être causé par une accumulation du fluide impondérable pour l'état dit positif, et par une soustraction pour l'état dit négatif. Par conséquent, on ne peut faire difficulté sur le principe que toute attraction est un effet de tension; mais il reste à déterminer par quel mécanisme un changement ou un déséquilibre de pression donne naissance aux mouvements attractifs à travers les milieux isolants et le vide.

La question limitée au cas des corps isolants se résout aisément. Étant connu par les phénomènes lumineux et électriques que le mouvement de l'éther à l'intérieur de ces corps est fort gêné, il devient facile de comprendre comment des différences de tension et de densité peuvent s'y établir, de même que cela arrive dans les solides ordinaires soumis à des pressions mécaniques extérieures. Or, les phénomènes d'induction moléculaire que présentent les isolants sont de simples effets de différence de tension intérieure, c'est-à-dire de pression, comme l'on dit en parlant des fluides.

Les attractions dans les milieux isolants résultent donc de ce que les pressions intérieures tendent sans cesse à l'équilibre, et il arrive souvent que l'éther dans ses mouvements entraîne la matière pesante. Les difficultés sérieuses surgissent lorsqu'on cherche à expliquer comment les attractions et les répulsions se peuvent exercer à travers le vide, c'est-à-dire dans l'éther libre, milieu auquel les considérations précédentes semblent ne pou-

voir s'appliquer. Mais en réalité les complications ne tiennent pas à la nature du problème; elles sont le fait des théoriciens qui veulent donner à l'éther libre les attributs des autres fluides, et spécialement la propriété de transmettre le choc moléculaire dans tous les sens avec la même intensité. Heureusement que les phénomènes optiques nous aident à sortir de cette fausse voie, en nous montrant qu'au sein de l'éther libre les mouvements de transport ne se font pas avec une égale facilité dans toutes les directions, et qu'il existe certains obstacles qui forcent les oscillations à devenir transversales. Ce seul fait nous montre clairemeut que la théorie des fluides ordinaires ne convient pas au fluide éthéré, parce qu'elle est fondée sur l'égalité parfaite de la transmission du choc dans tous les sens. Il n'est donc pas impossible qu'à l'intérieur de l'éther libre une différence de densité puisse s'établir d'une couche à l'autre comme dans les diaphanes. Ajoutons que la condensation et la raréfaction de l'éther à la surface des corps isolés est inséparable d'une activité plus grande de vibration sur cette couche, et par là peut aussi se produire à une grande distance dans l'éther ambiant un nouvel état d'équilibre forcé.

Ainsi la structure de l'éther, telle qu'elle nous est révélée par l'optique et l'électricité, nous donne le moyen d'expliquer les attractions, de quelque nature qu'elles soient, sans recourir aux entités dynamiques agissant à distance, ainsi que quelques-uns ont essayé de le faire.

Étant admis que dans les couches successives de l'éther libre des différences de densité peuvent prendre naissance, il s'ensuit forcément que les corps chargés d'éther en plus ou en moins ont autour de leur surface un état d'équilibre forcé qui persiste jusqu'à ce que par quelque moyen les choses retournent à l'état naturel, et le transport ou le déplacement des masses pesantes est un de ces moyens. Lors donc que les masses pondérables présentent

des conditions convenables de mobilité, elles peuvent être entraînées l'une vers l'autre pour faciliter ce rétablissement d'équilibre. De là les attractions et les répulsions. Enfin quelquefois, par sa force expansive, l'éther peut entraîner les parties constitutives des corps, et ainsi les désagréger.

Considérons maintenant la seconde classe des actions à distance, celle des actions électro-dynamiques et magnétiques, nous trouvons qu'elles se réduisent encore à des modifications du milieu universel. En effet, elles se peuvent expliquer en tenant compte à la fois de la diminution que subit la pression de l'éther dans un conducteur au moment où il est traversé par le courant, et de la composition des chocs réciproques des atomes de l'éther qui enveloppe les conducteurs : les atomes composant les couches voisines des conducteurs, par un effet de communication de vibration latérale, conçoivent des mouvements rotatoires et se constituent en tourbillons : une fois ces rotations développées dans l'éther, les réactions réciproques des aimants et des courants s'en déduisent naturellement d'après les règles de la composition des mouvements rotatoires.

Envisagé de la sorte, le magnétisme n'est plus une force spéciale, mais un agent universel, et ses actions se confondent avec celles de l'éther, fluide qui pénètre tout. Par conséquent, les effets singuliers excités par le magnétisme dans les corps, et distingués par des noms divers, sont tous de même ordre, et leurs différences résultent seulement du sens des rotations qui deviennent prédominantes par l'effet du courant. Ainsi, les mêmes rotations donnent naissance à des mouvements opposés, suivant que les tourbillons moléculaires sont faciles à orienter ou non, et cela fait que les corps sont magnétiques ou diamagnétiques. Dans les métaux en mouvement, le tourbillon éthéré accuse sa présence en leur faisant éprouver une résistance très-grande, accompagnée d'un développe-

ment d'électricité dynamique et de chaleur, comme cela arrive avec les fluides ordinaires en mouvement. Le courant est encore l'intermédiaire par lequel la force mécanique se transforme en chaleur, soit à l'intérieur des corps mis en rotation entre les pôles d'un aimant, soit dans les machines électro-magnétiques. Nous trouvons ici la réciproque du développement par la chaleur d'un courant employé à entretenir l'activité d'une machine.

Ainsi, tous les phénomènes magnétiques et électriques prennent leur origine dans le mouvement et s'y résolvent. La seule différence à établir entre les mouvements de l'éther et ceux que l'on étudie en hydro-dynamique réside en ce que, dans ceux-ci, un fluide sensible et pondérable entre en jeu, tandis que dans ceux-là le fluide en action échappe à nos sens, parce que, pénétrant tous les corps, il est incoercible.

Toutefois, dans quelques cas, l'éther parait, jusqu'à un certain point, être coercible, c'est-à-dire susceptible de se condenser ou de se raréfier, et alors il trahit pour ainsi dire son efficacité. Il produit alors des effets semblables à ceux de la force *qui tire les poids*. Nous pouvons donc inférer de là que, s'il est impondérable, c'est parce que lui-même est capable de produire des mouvements de même ordre que ceux causés par la gravité.

Cela nous porte à soupçonner que cette force mystérieuse, la gravitation, pourrait bien être un résultat de la présence et de l'action de l'éther dans l'espace, hypothèse qui, par cela seul qu'elle est probable, mérite l'examen; aussi le ferons-nous dès que nous aurons pris une connaissance plus approfondie de la constitution de la matière.

LIVRE IV

CONSTITUTION DE LA MATIÈRE

CHAPITRE PREMIER

INTRODUCTION. — AUTRES FORCES QUI RÉGISSENT LA MATIÈRE.
ACTIONS ORGANIQUES.

On se tromperait si, d'après le titre de ce dernier livre, on pensait que nous avons la prétention de dévoiler le mystère de la matière. Notre but est seulement de résumer ici ce qui a été dit dans les chapitres précédents, et d'appliquer les théories déjà établies à ceux des phénomènes qui peuvent s'y rattacher, dont nous n'avons pas encore parlé. Loin de songer à expliquer l'univers, nous chercherons seulement à pousser notre induction aussi loin que possible. Si, dans ces cas extrêmes, elle se trouve en défaut, cela ne portera aucune atteinte aux résultats acquis, ou plutôt conquis pour ainsi dire par nos premières recherches, et pleins de confiance en l'avenir nous laisserons aux investigateurs, qui nous succéderont, le soin de compléter l'œuvre commencée.

Les difficultés grandissent à mesure que nous pénétrons plus avant dans la question, et que l'objet de nos spéculations s'étend davantage. Les forces étudiées jusqu'ici se révélaient à nous par des phénomènes, qui prennent leur commencement et leur fin dans un mouvement sensible; aussi, bien que leur manière d'agir nous

restât inconnue, par le raisonnement nous sommes arrivés à découvrir leur nature, sans rencontrer d'obstacles sérieux. Les forces, dont actuellement nous entreprenons l'examen, se comportent tout autrement, tantôt leurs effets se produisent sans qu'il soit en notre puissance d'en maîtriser les causes; de les modifier dans le sens qui nous conviendrait le mieux, telle est, par exemple, la gravité; tantôt elles changent les propriétés des corps, telles sont les actions chimiques. Nous avons donc à résoudre le double problème de retrouver l'état antérieur des corps et d'expliquer le changement survenu; il nous faudra faire des hypothèses aussi bien sur la manière dont s'accomplit la réaction que sur l'état des parties qui y contribuent. Nous courrons donc grand risque de ne pouvoir nous laisser guider par l'enchaînement des faits, ce fil conducteur grâce auquel jusqu'ici nous ne nous sommes pas égaré dans le dédale des phénomènes naturels. De plus, dans la nouvelle classe de phénomènes qu'il nous reste à examiner, un même fait se prête à plusieurs interprétations différentes, et il n'est point aisé de discerner quelle est la vraie.

Vu la difficulté du sujet, assurément nous ne parviendrons pas, malgré nos efforts, à traiter tous les points à l'entière satisfaction de nos lecteurs, et de nous-mêmes. Nous croyons utile de faire cette réserve avant d'entrer en matière, afin que l'on ne nous accuse pas de forcer nos conclusions, et de donner pour certain ce qui est seulement probable.

Disons tout d'abord que notre intention est de considérer exclusivement la matière inorganique ; nous ne parlerons pas des actes de la vie végétale, encore moins de ceux où une autre substance associée à la matière en modifie les opérations de telle sorte que souvent, les effets observés diffèrent beaucoup de ceux que produirait la matière inanimée abandonnée aux lois qui lui sont propres.

C'est là un autre ordre de phénomènes, dont l'examen ne rentre pas dans le cadre que nous nous sommes tracé. Cependant les êtres qui sont le théâtre de ces opérations spéciales, n'échappent pas à l'influence des agents physiques ordinaires. Ainsi la chaleur est indispensable à la naissance et à la vie des êtres organisés; sans la lumière, la plupart d'entre eux ne sauraient se développer, et sur tous elle exerce un action bienfaisante; l'électricité est sans cesse mise en mouvement dans l'organisme, tant par l'effet des réactions chimiques que par les actes physiologiques.

Les êtres organisés envisagés sous le rapport de leurs fonctions matérielles, réactions chimiques et mouvements, sont soumis à l'empire des agents physiques, et comme tels satisfont au principe fondamental de la dynamique, que le mouvement ne naît jamais de rien et qu'il résulte toujours d'un autre mouvement. Nous avons déjà vu que les radiations solaires, sont la cause presque exclusive du travail végétal au sein des plantes; par une opération purement mécanique elles préparent les composés organiques, après quoi leur force vive reste éteinte. L'effet des vibrations lumineuses est ici comparable à ce qui arrive, lorsqu'un petit monticule de sable est déposé sur une plaque élastique de façon à n'en recouvrir qu'une très-faible étendue. Aussitôt que la plaque entre en vibration, son mouvement de frémissement se communique aux grains de sable, qui peu à peu se répandent sur toute la surface et s'arrangent en figures géométriques.

De tout côté on entend dire aujourd'hui que c'est la force vive du soleil *qui, emmagasinée dans les dépôts de charbon, alimente nos machines*. Or, il importe de bien préciser la véritable signification de cette manière de parler; à notre avis, voici comment on doit l'entendre. Il a été établi ci-dessus que l'acide carbonique est une com-

binaison chimique des plus intimes, c'est-à-dire que les atomes élémentaires sont fortement serrés les uns contre les autres. Malgré la stabilité de ce corps, le soleil agissant par l'intermédiaire de l'organisme végétal, le décompose et le transforme en d'autres moins stables, résultant de l'association des éléments de l'acide carbonique avec ceux de l'eau. Durant cette opération, la force vive des rayons solaires s'éteint[1], car le travail exécuté ayant pour objet d'augmenter la distance, qui séparait les atomes du carbone de ceux de l'oxygène, est du même genre que le travail qui produirait l'élévation d'un corps grave à une certaine hauteur au-dessus de la surface d'une planète. Quand ces matériaux une fois formés sont abandonnés à eux-mêmes, dans des conditions que nous ne connaissons encore que très-imparfaitement, ils se transforment en houille, laquelle à son tour, soit par un travail naturel, soit à la suite d'un traitement artificiel spécial (la calcination dans une cornue à gaz, par exemple), peut devenir charbon pur; dans l'un ou l'autre cas, cette élaboration plus avancée nécessite un travail thermique. Le carbone étant parvenu à cet état, les physiciens modernes disent qu'il tient emmagasiné une grande quantité de force vive, ce que l'on doit entendre ainsi. Pour isoler le carbone et le rendre indépendant des autres éléments auxquels il était combiné, il a fallu dépenser une grande force vive, car, comme nous venons de le dire, le travail accompli est comparable à celui dont l'effet serait l'arrachement d'une certaine masse de la matière d'une planète et son élévation à une hauteur telle que celle-ci soit désormais sans action sur elle. Il importe donc de ne pas prendre dans un sens erroné l'expression introduite depuis peu par la thermodynamique dans le langage de la science. La molécule de charbon n'a pas en soi

[1] Livre II, ch. VI.

toute la force vive, dépensée à la mettre en liberté, pas plus qu'une pierre, élevée au-dessus du sol, ne renferme une quantité de mouvement ou de force vive égale à celle qui l'a élevée à la hauteur où elle se trouve. Mais de même que la pierre, en tombant sur la terre, reproduit sous forme de chaleur ou de toute autre force, la force vive qui l'en avait séparée; de même quand la molécule de charbon, jadis arrachée à la combinaison, se précipite de nouveau vers l'oxygène, elle restitue la force vive qui, fournie par le soleil et nos fourneaux, avait opéré son isolement, et cette force vive se manifeste comme chaleur pendant le conflit moléculaire de la combustion. Si bien qu'en réalité le charbon nous rend la force vive qu'il a reçue antécédemment du soleil, et il est permis de dire que le charbon est un dépôt de force, comme une masse d'eau élevée à une certaine hauteur est un réservoir de force. Il est évident que par là on renferme sous une forme concise une longue suite d'idées. Il est bon d'en être prévenu, sinon on regarderait, comme principe ou conclusion, ce qui n'est en définitive qu'une expression destinée à simplifier le discours.

Une autre manière d'emmagasiner une force, c'est d'augmenter la rotation des molécules, comme cela se fait à l'aide des volants des machines. Très-probablement semblable chose a lieu aussi dans les actions dont nous parlons.

Notre observation demeure vraie, quelque idée qu'on se fasse de la nature des forces en jeu et de leur mode d'action. Nous exposerons bientôt nos idées sur ce point; pour le moment, il suffit d'avoir nettement défini le sens d'une locution qui a été en butte à de nombreuses critiques, le plus souvent parce que ceux-là mêmes qui l'attaquaient, ne comprenaient pas sa signification véritable.

Dans les animaux ce sont les aliments qui, en brûlant au sein de l'organisme vivant, engendrent la puissance motrice

nécessaire à la circulation des fluides au sein des tissus vivants, et de plus celle qui est dépensée en mouvements extérieurs ; si bien que dans les moteurs animés comme dans les autres, il y a conversion de la chaleur en mouvement[1]. Enfin, les animaux qui, pour se défendre, étourdissent leurs ennemis en leur lançant une commotion électrique, tombent dans un état d'épuisement et d'affaiblissement remarquable après des décharges réitérées. Les physiologistes ont montré que les combustions internes s'accomplissent au sein des muscles, et non dans le poumon comme on le croyait anciennement, la fonction de cet organe étant de permettre au sang de se débarrasser de l'acide carbonique et d'absorber sans cesse une nouvelle quantité d'air vital. Admirable opération dont le mécanisme est maintenant bien connu, surtout depuis que la théorie mécanique de la chaleur a prêté son appui à la physiologie.

Cet élément de l'activité des êtres vivants, pour être des plus importants, n'est cependant pas le seul ; il faut aussi tenir compte d'une action spéciale, liée visiblement à une certaine disposition moléculaire, laquelle, une fois établie, permet à cette action de se continuer tant que les matériaux aptes à l'élaboration ne font pas défaut, et que la disposition est conservée intacte. C'est cette disposition nécessaire que nous nommons *organisme*.

L'organisme suppose comme condition première une disposition convenable, qui en rende les parties constituantes capables de produire un double effet : 1° une action extérieure ; 2° une action intérieure qui assure la conservation du mécanisme lui-même. Cette disposition ne peut spontanément prendre naissance au milieu de la matière brute, elle y réside à l'état de *germe ;* et un germe suppose des conditions, qui ne peuvent être réalisées par

[1] Voy. liv. II, ch. IV.

une simple combinaison effective d'après les lois qui régissent les molécules de la matière inorganique.

Afin de rendre notre idée plus clairement, prenons comme terme de comparaison les machines ordinaires. On n'arrive pas à construire une machine ordinaire en mettant ensemble, fer, charbon, eau, etc., il faut distribuer ces éléments d'après un certain ordre, subordonner les uns aux autres. Une expression empruntée au langage philosophique rendra notre pensée assez exactement, il faut *leur donner une forme*. La forme n'a rien de substantiel, elle ne consiste qu'en une coordination convenable des parties; sans elle la machine n'existe pas : les parties employées ne pouvant d'elles-mêmes ni se façonner soit en tubes, soit en roues, ni s'adapter les unes aux autres, suivant tel ou tel ordre. Un *mécanicien* est indispensable, c'est-à-dire un agent extérieur doué de facultés supérieures à celles de la matière grossière, instruit des rapports abstraits à établir entre les quantités qu'il emploie; en un mot, un être *intelligent*. Une fois la *forme* donnée aux pièces de la machine, les agents physiques entrant en jeu pourront produire des effets, dont autrement ils n'auraient jamais été capables. Ainsi la pesanteur opérera contre elle-même, la chaleur appliquée à une extrémité du système, déterminera un refroidissement à l'autre extrémité et ainsi de suite.

Pareilles conclusions s'appliquent relativement à l'organisme : de l'union de l'oxygène, de l'hydrogène et du carbone de quelque façon qu'on les assemble, alors même que la loi des proportions est scrupuleusement observée ; ne sortira jamais une molécule végétale vivante. On a obtenu certains des produits qui s'élaborent dans les tissus végétaux ou animaux, mais non les tissus eux-mêmes organisés. On a obtenu des substances *organiques*, une substance *organisée* jamais, et encore moins un *organisme*. La génération spontanément opérée par les seules forces de la matière brute est une impossibilité, et, jus-

qu'ici, elle n'est prouvée par aucune expérience exempte d'objections; il en est de même de la transformation des espèces, théorie d'après laquelle un organisme serait transformable en un autre : il est aussi absurde d'admettre de semblables idées que de croire qu'une montre puisse d'elle-même se changer en une machine à vapeur [1].

Cette doctrine, du reste, est contredite par les faits et l'observation la plus élémentaire. Combien de siècles se sont déjà écoulés, et, malgré le croisement de races voisines et même très-voisines, aucune nouvelle espèce féconde n'a pu être obtenue. Mieux encore; ou bien les conditions de milieu, dans lesquelles se produit la nouvelle espèce, *exigent* la transformation de l'espèce préexistante, alors celle-ci doit périr, ou bien elles sont telles qu'elles n'*entraînent pas nécessairement* une transformation, et alors la nouvelle espèce ne se développera pas; à moins d'admettre un caprice de la nature, une volonté indépendante de l'absolue nécessité des circonstances ; mais cela revient à croire à l'action d'une cause libre, et c'est précisément ce que l'on voudrait exclure. Il est impossible de faire valoir que les conditions nécessaires à la transformation, existent dans un lieu et manquent dans un autre; car le même individu qui se transforme, ne peut à la fois exister en deux lieux différents, et subir simultanément deux influences : l'une qui l'oblige à se modifier et l'autre pas.

Comme dernière ressource, les défenseurs de la variabilité des espèces, poussés à bout, disent que la transformation s'effectue par degrés infiniment petits, compatibles avec les influences les plus diverses. Mais alors nous les prions : 1° de nous dire où sont ces variétés intermédiaires, qui, d'après eux, devraient exister en nombre infini; l'histoire naturelle, la géologie elle-même sont

[1] Voy. à ce propos l'ouvrage de Flourens, en réponse à Darwin, qui est annoncé dans les Comptes rendus de l'Académie des sciences du 14 mars 1846.

muettes sur ce point ; et tout indique que ces divers termes de transition n'existent pas. Comment donc accepter une théorie qui n'a pour s'appuyer aucune donnée d'observation.

En second lieu, nous disons que les degrés insensibles n'existent pas dans la nature, et seulement dans notre esprit. C'est notre esprit qui, faisant abstraction des particularités individuelles, crée les genres et les espèces exclusivement par la comparaison des idées générales. Mais dans la nature tout est individuel, et tout individu existant est en soi une réalité indépendante et qui n'influe pas directement sur l'existence des autres ; un seul des caractères que l'on nomme habituellement secondaires ou accessoires, a une importance et une réalité tout aussi grande que ceux, qui sont regardés comme fondamentaux et de premier ordre.

Avouons donc que ces révolutions théoriques de l'école nouvelle sont insoutenables, et sont de pures imaginations, à l'appui desquelles on ne peut fournir aucune des preuves sérieuses que réclame la science véritable.

Il existe à la vérité dans la nature une admirable série d'êtres, un déploiement merveilleux de formes, les unes très-simples, les autres très-complexes, une variété infinie d'organismes, depuis les plus rudimentaires jusqu'aux plus élevés ; mais les lois de la matière ne suffisent pas à donner la raison de cette diversité, et il est nécessaire de reconnaître un principe libre qui, dans le choix et la coordination des formes, a assigné, parmi l'infinie variété des formes possibles, celles qui étaient en harmonie avec les lois primordiales des forces physiques librement établies par lui.

Plus on étudie la nature, mieux on voit que les formes de la matière brute sont limitées ; plusieurs actions, regardées d'abord comme inorganiques, lorsqu'elles ont été mieux connues se sont trouvées être liées au développe-

ment d'êtres vivants ; telles sont les fermentations et les putréfactions. Ces actions sont dues au développement de plantes et d'animalcules ayant des dimensions fort petites, et une structure très-imparfaite, disons-nous, bien que leur mécanisme nous soit aussi inconnu que celui des organismes les plus élevés dans l'échelle des êtres. Un organisme, quel qu'il soit, est l'œuvre de l'*Éternel Architecte*; et ce que nous appelons la nature n'est autre que le travail et *l'art* de ce Maître Suprême. C'est lui qui donne la forme à la matière organisée, comme il a donné l'existence et le mouvement primordial à la matière brute. Exclure cette action, sous quelque prétexte que ce soit, c'est se fermer la voie des explications, même pour les phénomènes où elles sont manifestes. Cela est si vrai que ceux qui ont voulu tout expliquer par la seule matière ont été obligés de la douer de *forces* et de *puissances actives* insuffisantes et très-variées pour satisfaire à ces besoins; et ils n'ont pas pris garde que ces forces contrastaient ouvertement avec le caractère fondamental de la matière qui est l'*inertie*.

Admettre une puissance suprême et libre qui règle la matière à son commencement, ce n'est pas dire qu'à l'enchaînement scientifique doive se substituer l'arbitraire, auquel cas la science devient impossible. La science, en effet, consiste à déduire l'effet de sa cause, et quand la loi demeure constante, cela est toujours possible. Avancer que les lois de la nature ne sont pas nécessaires d'une façon absolue, ce n'est pas soutenir qu'elles soient changeantes et soumises au caprice. L'Éternelle Sagesse qui les fixa dès le principe, les choisit telles que partout régnât l'harmonie. C'est à la connaissance de cette harmonie que l'homme emploie tous ses efforts. *Constance* dans la loi n'est pas synonyme de *nécessité*. Des philosophes, très-respectables du reste, ont confondu à tort ces deux notions, et de là ils ont tiré des conséquences absurdes. Ainsi, par exemple,

voyant que toujours au moment où deux corps se choquent il y a transmission du mouvement de l'un à l'autre avec constance de travail perdu ou gagné, ils ont cru à une *nécessité absolue*, et comme en cherchant dans la nature de la matière elle-même ils ne trouvaient pas la raison du phénomène, ils ont eu recours à des forces intermédiaires et à des *activités* mises en jeu : êtres imaginaires et de pure fantaisie. Cette première création accomplie, ils ont jugé qu'ils pourraient bien se dispenser de l'action primitive de la Divinité et de son action conservatrice et providentielle.

Si ces philosophes avaient bien considéré les phénomènes dont il s'agit, ils auraient vu que dans cette loi il y a sans doute *constance*, mais non *nécessité absolue*. Nous pouvons trés-bien comprendre le cas d'un corps qui, en frappant un autre, s'arrête lui-même sans rien communiquer à l'autre : cela n'arrive pas, il est vrai; mais cette loi fondamentale de la nature ne prouve pas sa nécessité absolue : elle serait possible dans un autre ordre de principes.

Les lois du mouvement, fixées par Newton, n'ont pas leur raison d'être dans l'essence de la matière, mais dans un acte libre de la Puissance suprême. Tous ceux qui ont cherché à en assigner la nécessité absolue ont échoué, ou, par une contradiction encore plus flagrante, ils ont attribué à la matière elle-même les propriétés qu'ils refusaient à un Principe libre, éternel et intelligent.

D'autres philosophes, au contraire, sont allés à l'autre extrême. Ils ont prétendu que dans les corps vivants et organisés les forces physiques n'agissent pas, et ils se sont mis ainsi en contradiction avec les faits les plus évidents.

Les forces physiques et chimiques ordinaires servent à la conservation de l'être organisé, à son accroissement et à sa reproduction; envisagé sous ce rapport, un être vi-

vant parcourt une série de phases parfaitement comparables, au moins tant que nous le permet notre faible vue, à ces machines dont le mouvement est entretenu par un ressort ou une pile électrique, une fois montées, elles exécutent une série de mouvements déterminées jusqu'à ce que le ressort soit détendu, ou la pile épuisée.

On doit éviter l'exagération dans un sens comme dans l'autre, et s'il ne faut pas refuser aux forces physiques l'activité qu'elles possèdent, pas davantage il ne faut leur attribuer celle qu'elles n'ont pas. Envisagés superficiellement, certains phénomènes de la matière brute semblent indiquer qu'il existe en elle une autre substance, un principe différent de la matière; ainsi les anciens croyaient à la présence d'un esprit dans l'ambre frotté et l'aimant; mais une analyse plus rigoureuse des faits a ramené ces forces à n'être comme toutes les autres que des mouvements spéciaux de la matière. Il en est de même de la force végétale qui résulte d'un organisme particulier. Mais ni l'organisme ni toutes les forces qui opèrent en lui, ne nous donneront jamais la raison du principe de la sensibilité, et encore moins du principe intelligent auquel il est constamment associé.

L'idée de *force* est en soi une idée confuse, équivoque, *nébuleuse* pour ainsi dire, qui cache, on ne sait quel mystère; si bien qu'elle prête facilement au sophisme et rend possibles les explications les plus opposées d'un même fait. En examinant les choses de plus près et avec plus de précision, on reconnaît que les forces de la matière se réduisent au mouvement. Mais plusieurs des phénomènes que nous voyons se produire dans les animaux, et ceux auxquels participe notre propre individu, sont tels qu'ils ne peuvent être rapportés seulement au jeu des forces régissant la matière brute; donc partout où ces phénomènes se traduisent à nous, il est nécessaire d'admettre une autre espèce de forces.

Cela devient surtout indispensable lorsqu'on examine l'ensemble des manifestations rationnelles de l'homme, car, suivant une remarque fort judicieuse de Tyndall (Discours d'inauguration de la Société britannique de 1868, section de physique et de mathématiques), quand même nous arriverions à connaître les mouvements qui, dans les fibres cérébrales, accompagnent nos sensations; il resterait toujours à expliquer comment nous avons la *conscience* de ces impressions. Entre cette conscience et la modification de l'organe s'étendra toujours un abime, que le matérialisme ne pourra franchir, parce qu'il se trouve là en présence de quelque chose, qui diffère en tout de la transformation d'un mouvement en un autre.

Cette conscience n'est, en somme, que la modification de l'être pensant, c'est un phénomène qui n'a rien de commun avec le mouvement, et qui, d'après le témoignage du sens intime, n'a rien de matériel. On a dit, et peut-être avec raison, que sans phosphore il n'y a pas de pensée, mais on peut ajouter que sans oxygène il n'y a pas de pensée non plus, car étant donné, qu'une matière est nécessaire à la formation de l'organe perceptif, il ne s'ensuit pas que cette matière constitue la perception elle-même, c'est-à-dire la conscience. Ainsi l'étude attentive de la matière conduit à admettre en nous un principe immatériel, qui régit et commande. Jusqu'à quel point ce principe immatériel domine-t-il la matière? nous l'ignorons; et probablement c'est en exagérer l'importance que de vouloir, à l'exemple de quelques-uns, le substituer à toutes les forces physiques nécessaires au développement de l'organisme. Toutefois la divergence d'opinion qui règne encore sur la question de savoir quelles sont les limites du principe dominateur de la matière organisée n'autorise qui que ce soit à nier l'existence de ce principe.

Ce que nous disons, acceptant le témoignage du sens intime, de l'existence en nous d'un principe différent de la matière, est encore applicable au reste de l'univers. Si au dedans de nous réside une force autre que la matière : bien plus, si l'homme lui-même est constitué dans sa partie la plus noble par ce principe : s'il n'est pas son propre auteur, évidemment la cause qui l'a produite aura, pour le moins, pareille qualité et capacité, c'est-à-dire personnalité, raison et intelligence, avec cette différence, que, puisqu'on ne peut remonter indéfiniment la série des causes successives, l'une de celles-ci doit présenter à un degré suréminent tous les attributs que l'homme ne possède que par simple communication.

L'étude des forces physiques amène donc à reconnaître comme nécessaire l'action immédiate d'un *Être supérieur* à la matière ; et il est vraiment absurde de prétendre, à l'exemple de certains philosophes, expliquer les actes de l'intelligence par une activité de l'organisme, doué à cet effet d'une puissance extraordinaire.

L'homme ne peut comparer son œuvre à celle de son créateur, parce que ses moyens d'action sont trop grossiers, il ne peut mettre en œuvre que la matière pesante et la forme qu'il lui donne pour l'adapter à ses machines se ramène constamment à deux types : la corde et le levier. Quand il utilise quelque autre agent, soit le mouvement moléculaire calorifique, soit le mouvement de l'éther, c'est par l'intermédiaire de systèmes matériels très-compliqués; toujours est-il qu'il parvient ainsi à des résultats merveilleux ! L'application directe des mouvements moléculaires est tout à fait hors de notre portée, et même, à dire vrai, nous ne connaissons que très-imparfaitement le mécanisme de ces actions. Nous admettons des tourbillons, parce que c'est l'idée la plus simple que notre esprit se forme des mouvements dans les fluides ; mais quand il s'agit d'un assemblage de molécules organisées, chacune

d'elles par la complication de ses mouvements et de sa structure, est comparable à une de nos machines les plus savamment combinées. Car à voir une légère variation de température en plus ou en moins arrêter ou exciter tout le mécanisme moléculaire, et tous les systèmes organisés, au moins ceux qui ne sont pas des plus rudimentaires, ne jamais résister à la chaleur quand elle dépasse un certain degré, il est impossible de douter de l'énorme complexité de leurs mouvements internes.

Les végétaux sont de tous les corps organisés les plus simples. L'organe qui sert de base à leur développement est la cellule que nous voyons naître d'une autre semblable à elle, puis se multiplier et former d'autres organes par leur juxta-position. L'activité végétale exige pour s'exercer de la lumière, certains éléments minéraux, de l'humidité, etc.; que l'un de ces éléments vienne à manquer et le germe se conservera intact pendant une longue suite de siècles, comme on l'a reconnu sur les graines trouvées dans les tombeaux égyptiens, puis reprendre le cours de son évolution, lorsqu'il se trouvera dans les conditions nécessaires à son développement. C'est là ce qui n'arrive jamais à l'animal parfait, il ne peut suspendre toutes ses fonctions sans périr. Les actions chimiques qui, dans les plantes, s'accomplissent sous l'influence de la lumière et de la chaleur, peuvent être imitées artificiellement dans nos laboratoires, les produits obtenus dans les deux cas sont semblables: ce que nous ne parvenons jamais à imiter c'est le *mode d'action.* Sauf cela, il n'y a rien dans la végétation qui ne rentre dans le domaine de la chimie ou de la physique. Si bien que l'agencement organique associé au mouvement, d'après une certaine *forme,* permet d'expliquer les phénomènes de la vie végétale. Les anciens, très-enclins à tout traduire sous une image sensible, attribuèrent les fonctions des végétaux à *une âme végétante;* mais rien n'empêche de les regarder toutes

comme résultant du jeu d'une certaine disposition des parties animées par les forces physiques[1]. Assurément il ne nous est pas donné de comprendre tous les mouvements, qui s'accomplissent dans un végétal et de saisir le secret de l'état d'agrégation de ses parties, mais autre chose est de comprendre comment arrive un effet et d'assigner la nature du principe causal.

Tout au contraire, dans les animaux existe un principe, qui, supérieur à la matière, en commande les réactions. Les forces physiques lui fournissent l'élément de première nécessité, c'est-à-dire le mouvement qui constitue le fond de tous les actes de l'organisme. Les effets de ces forces soumises à l'influence de ce principe ne sont pas les mêmes, que lorsqu'elles en sont affranchies, de sorte que dans les fonctions animales, les mouvements beaucoup plus complexes, beaucoup plus délicats que dans les fonctions végétales, sont pour ainsi dire d'un ordre supérieur. C'est le même principe qui fait passer une certaine quantité de mouvements d'un point de l'individu à un autre, qui fait que ce mouvement se communique aux objets extérieurs, tout en se conservant comme élément du mouvement général de la matière. Aux derniers degrés de l'échelle des êtres (dans les polypiers marins et les infusoires, par exemple), il est souvent difficile de décider si les mouvements sont automatiques ou volontaires, mais dans les classes élevées le doute n'est pas possible. En un mot, dans les animaux le mouvement, qui est toujours le résultat du concours des forces physiques, joue seulement le rôle d'instrument, de moyen mis à la disposition du principe supérieur, et il est ordonné par ce principe en vue d'un but voulu. La comparaison suivante,

[1] Voy. à ce sujet l'excellent article sur la nutrition, dans le *Traité de Chimie* du professeur Purgotti, 3e édition, Pérouse (p. 18 et suiv. de l'Extrait tiré à part.)

bien qu'incomplète, est encore celle qui aidera le mieux à rendre notre pensée. Considérez une locomotive, quelque parfaite que vous la supposiez, jamais d'elle-même elle n'entrera en mouvement, et ne se mettra à fonctionner avec régularité; il faut le mécanicien qui ouvre la clef, gouverne le tiroir de façon à la faire avancer ou reculer, etc. De même les animaux doués de mouvements volontaires, non-seulement possèdent ce mouvement, cet attribut inséparable de la matière brute, mais en eux se révèle encore une puissance directrice, d'un ordre plus élevé que la matière. La vie envisagée au point de vue des phénomènes purement matériels, se réduit à un mouvement de parties fluides, ayant la propriété de subvenir à l'accroissement et au renouvellement des organes au sein desquels ils circulent. Que ce mouvement vienne à cesser dans l'être, aussitôt *il meurt.*

Quand la mort d'un animal est causée par une lésion traumatique d'un organe nécessaire à la circulation ou par l'obstruction des vaisseaux, les forces physiques demeurent libres d'agir sur la matière; et même quand l'organisme n'est pas détruit par la violence de l'action extérieure, le feu, par exemple, les dilatations inégales causées par la chaleur qui n'est plus maintenue à un degré constant par l'action de la vie, troublent l'agrégation des parties; l'humidité extérieure qui envahit les tissus, n'en étant plus empêchée par les circulations organiques, les altère, parce qu'elle y introduit des éléments étrangers; et ainsi commence le lent travail de destruction.

Le plus ordinairement la décomposition d'un corps organisé survient, parce que d'autres êtres organisés, d'ordre inférieur, se développent à ses dépens et se nourrissent de sa substance. Ainsi les mousses qui se développent sur les arbres morts, les vibrions et les autres infusoires infiniment petits qui déterminent ce que l'on appelle la putréfaction, sont les agents par l'intermédiaire desquels la

matière organisée retourne au monde inorganique. Que l'on empêche ces actions de se produire, et la forme organique ne se détruit pas, ainsi que cela a été réalisé dans les magnifiques préparations anatomiques du professeur Brunetti de Padoue ; il est donc faux que la matière organisée, pour subsister sous la forme qui lui est propre, doive être soumise à des forces spéciales; il faut seulement une action première qui dirige ces forces de façon à en obtenir le résultat à la production duquel l'organisme est destiné. La disposition matérielle, une fois réalisée, elle peut persister alors même que la vie a cessé[1].

Le végétal dans le grand édifice de la création, paraît destiné à organiser la matière inorganique, qui peut alors servir à l'animal. Celui-ci ne se *nourrit* pas et n'assimile que la matière déjà organisée, tant végétale qu'animale. Toutefois, il n'est pas encore démontré que le végétal ait, de par lui-même, la force nécessaire pour rendre organique celle qui ne l'est pas du tout. La nécessité de le nourrir avec de l'air tel qu'il est dans l'atmosphère, c'est-à-dire renfermant en abondance des émanations organiques, porte à croire que, pour certaines fonctions des plantes, il faut une matière ayant déjà subi une première élaboration. Jusqu'à quel point cette élaboration préalable est-elle nécessaire? On l'ignore. Et c'est là un problème digne d'attirer l'attention des observateurs. La plante est encore

[1] Sur les ferments végétaux et animaux qui sont la cause des prétendues *forces putrides* ou de dissolution. Voy. Pasteur. Comptes rendus 29 juin, t. LVI, 1863. Les ferments que l'on peut regarder comme végétaux *monas bacterium* etc., vivent dans l'oxygène et dégagent de l'acide carbonique Les ferments animaux, *vibrions*, etc., se conservent dans l'acide carbonique, tellement qu'ici la relation qui existe sur une si vaste échelle entre les plantes et les animaux se trouve renversée. *Les extrêmes se touchent*. (Voy. p. 1191). Ajoutons encore les *mucores* et les mucédinées, qui sont de véritables végétaux. La putréfaction diffère de la gangrène, parce que celle-ci est en quelque sorte une vie purement chimique, (p. 1194).

destinée dans l'économie de la nature à détruire ces combinaisons, qui accomplies au sein de l'organisme animal et rejetées dans l'atmosphère, en changeraient bientôt la composition. Ainsi un admirable équilibre règne dans l'univers, et la solidarité des animaux et des végétaux est si étroite, que la vie des unes est indispensable à l'existence des autres. Existence, mouvement, vie végétale, sensation, intelligence, telles sont les cinq termes de la création. L'Auteur suprême alors qu'il donna l'existence à la matière brute, lui communiqua encore un principe d'activité consistant en un mouvement indestructible. Dans d'autres systèmes moléculaires, le mouvement devint la résultante d'une disposition spéciale, soumise tout entière à l'empire des forces physiques ; enfin, dans un dernier groupe, les réactions de la matière furent réglées par un principe supérieur, auquel elle fut associée ; et à celui des êtres qui occupe le sommet de l'échelle, à l'homme seul, l'auteur de la nature donna la lumière de la raison, qui lui confère la puissance de se connaître lui-même, de connaître son créateur, ses œuvres, les causes des choses, et enfin, jusqu'à un point d'imiter le travail de la nature.

A toutes ces actions, la matière sert de base et de moyen, en se modifiant sans cesse par le mouvement ; et, ce sont exclusivement les modifications qu'elle éprouve, que nous voulons examiner ici.

CHAPITRE II

STRUCTURE DES CORPS. — IMPÉNÉTRABILITÉ, POROSITÉ, DIVISIBILITÉ. THÉORIE ATOMIQUE.

Des faits analysés dans les livres précédents ressortent les conséquences suivantes :

1° La matière est continuellement en mouvement, son agitation se manifeste sous la forme de calorique. On

peut regarder les molécules matérielles comme douées d'une force répulsive et désunissante, dont l'activité augmente, à mesure que l'état d'isolement des molécules devient plus grand, et que les masses sont réduites à de moindres dimensions.

2° Outre la matière palpable et sensible, existe, disséminée dans l'espace et les corps, une substance subtile qui directement échappe à nos sens, mais dont nous percevons très-nettement les effets à cause des modifications qu'elle imprime à la matière pesante. Cette substance se manifeste à nous spécialement sous la forme des mouvements nommés radiation. Sa matérialité et son inertie sont démontrées par l'échange de travail qui s'accomplit souvent entre elle et la matière pesante.

3° Au sein des corps pondérables se manifeste un autre genre de mouvement; c'est celui d'une matière extrêmement subtile, qui tantôt coule comme un fluide, tantôt s'accumule en tension à leur surface, d'autres fois les ébranle au point de les désagréger. La matière en question est incoercible, elle concourt à la formation de tous les corps, si bien qu'on doit la regarder comme n'étant autre que l'éther. Il est complétement inutile d'imaginer deux espèces de matières subtiles pour expliquer les différences, qui, sous le rapport des propriétés optiques et électriques, séparent les substances en transparentes ou isolantes, et opaques ou conductrices; car ces différences tiennent non à une diversité de nature, mais à l'état d'agrégation qui donne aux unes la faculté de propager les mouvements dans le sens transversal, et aux autres dans le sens longitudinal. Enfin, les changements d'équilibre dans l'éther déterminent souvent l'agitation de la matière pesante : de là les attractions et les répulsions électriques.

Demandons-nous maintenant si les principes à l'aide desquels, jusqu'ici, nous avons expliqué un grand nombre de phénomènes naturels, sont encore applicables aux

autres forces qui gouvernent la matière, la cohésion, l'affinité chimique et la gravitation. Déjà dans le cours de cet ouvrage nous avons esquissé quelques vues théoriques relativement à ces questions délicates, mais c'étaient de simples conjectures, qu'il nous faut maintenant développer et soumettre à une analyse critique. En premier lieu, examinons la valeur d'une hypothèse, qui pour n'avoir pas été formulée nettement jusqu'ici, a été cependant admise d'une manière implicite : la matière est-elle ou non formée de particules discontinues.

A considérer un corps d'après ses caractères les plus essentiels, il se présente à nous comme un ensemble de *forces*. La principale, la plus fondamentale de toutes ces forces, est celle de résistance ou d'impénétrabilité, c'est elle qui, entrant en jeu toutes les fois qu'un corps change d'état, passe du repos au mouvement ou du mouvement au repos, constitue ainsi *l'inertie*. Lorsque cette force agit dans une *étendue figurée*, elle constitue à proprement parler un *corps*. Les physiciens regardent les objets comme une réalité extérieure, et admettent comme fait la communication du mouvement d'un corps à un autre par le contact. Il ne cherchent pas à expliquer comment cela s'opère, ils veulent seulement réduire les autres faits à ce fait unique. Telles sont les limites qu'ils imposent à leurs recherches : tout ce qu'elles ne comprennent pas relève, disent-ils, du métaphysicien [1]. Ainsi il n'appartient pas à la physique de décider, si les éléments sont simples ou non ; disons plus, cela lui importe peu. Que l'atome

[1] Cette déclaration que nous avons déjà faite plus d'une fois, a sans doute échappé aux personnes qui critiquant nos idées, nous ont objecté que dans les communications du mouvement au contact, tout est *mystère*, répétons-le donc encore une fois, nous acceptons la communication du mouvement au contact comme un fait, et si nous cherchons à y ramener la transmission, s'effectuant, comme l'on dit, à distance, c'est parce que le premier mode est plus facile à concevoir que l'autre.

primitif soit impénétrable, et occupe l'étendue d'une sphère solide de rayon défini, ou bien que ce soit un élément simple occupant le centre d'une sphère géométrique, et agissant jusqu'à une distance de ce centre, de façon à produire l'impénétrabilité, pratiquement parlant, les résultats sont les mêmes : de telle sorte que la physique n'a pas qualité pour trancher cette question, c'est affaire de métaphysique.

Mais l'étendue occupée d'une façon sensible par le corps n'est pas réellement *remplie* tout entière de ce quelque chose qui le constitue et que nous nommons matière, et dont nous mesurons la quantité par l'inertie, c'est-à-dire par la masse. L'expérience permet dans plusieurs cas de rendre sensibles les lacunes considérables, qui existent dans l'espace occupé par un corps, et, à défaut de l'observation, le raisonnement suffirait à prouver l'existence d'intervalles vides très-multipliés qui sont les *pores*. Un corps est donc en réalité un ensemble discontinu, alors même qu'il s'offre à nous avec une continuité parfaite en apparence. On ne possède aucune donnée certaine sur la grandeur de cet espace vide. Quelques physiciens comparant la densité de l'eau à celle du platine écroui, conclurent que dans l'eau le rapport du plein au vide devait être de 1/22 (Pianciani). Dans ces derniers temps, les travaux de Hirn sur la chaleur l'ont amené à admettre, que la valeur de ce rapport était à peine de 1/10. La décision de ce point touche de trop près à la constitution des éléments de la matière, pour que nous puissions la donner en ce moment. Les changements de volume que les corps éprouvent sous l'influence de la chaleur, étant dus au mouvement moléculaire, ne prouvent-ils pas irréfutablement la discontinuité de la matière, car il ne saurait y avoir mouvement des parties de la matière, si elle n'est pas discontinue. Les parties indivisibles et les pores des substances sont d'une telle ténuité qu'ils échappent complétement à nos sens ; pour

en donner une idée, nous rappellerons que les ondes lumineuses, jaunes, qui ont une longueur d'un demi-millième de millimètre, sont immensément plus grandes que les derniers éléments des corps. Dans certaines diatomées circulaires dont le diamètre égale la longueur de l'onde rouge, on peut compter sur cette ligne plus de cent cellules, dont chacune présente des étranglements et des renflements successifs, et est formée de parties renfermant un organisme *composé lui-même de molécules de diverses substances* [1]. D'autres végétaux et infusoires microscopiques ont une longueur moindre que celle d'une onde lumineuse, et cependant ils contiennent tous les organes nécessaires à leur nutrition et aux autres fonctions vitales.

Comment douter après cela, qu'il est à jamais impossible de déterminer les dimensions des dernières parties de la matière. Nous sommes entre deux infinis, l'infiniment grand des espaces célestes et l'infiniment petit des distances atomiques. Par un puissant effort d'induction, nous concevons les atomes réunis en systèmes moléculaires à l'intérieur des corps. De même que dans le champ du télescope l'astronome voit une nébuleuse se résoudre en étoiles, dont chacune est un soleil autour duquel circule un monde de planètes avec leur cortége de satellites, ainsi le microscope nous montre les molécules des corps formées d'agrégats et de systèmes atomiques d'ordre successivement plus élevé, bien que la proportion, entre les volumes des atomes et leurs intervalles, soit loin d'être la même que celle que nous observons entre les dimensions des mondes répandus dans l'espace infinis, et les énormes distances qui les séparent. Ainsi notre œil nous fait défaut, malgré les puissantes ressources que l'optique met à sa disposition; et le raisonnement est

[1] M. le comte Casvacane a mesuré six mille cellules de l'*amphiplrura pellucida* sur la longueur d'un millimètre!

le seul moyen analytique que nous puissions utiliser.

Lorsqu'on considère les divers degrés de la condition physique de la matière, qui passe successivement à l'état solide, liquide, gazeux, on ne peut échapper à cette persuasion que les systèmes moléculaires sont plus compliqués dans les solides que dans les liquides, et plus dans ceux-ci que dans les gaz, enfin de moins en moins dans ces derniers à mesure qu'ils sont davantage raréfiés, sans toutefois changer de nature chimique. A la suite de la disgrégation physique, nous pouvons maintenant placer la dissociation chimique, régie par les mêmes lois que les changements d'état physique (H. Deville). Quand intervient ce mode de division, l'esprit se refuse à concevoir à quel degré de rareté la matière peut atteindre. Donc, il n'est pas étonnant que des écoles philosophiques aient regardé la matière comme constituée par une série de systèmes particulaires de plus en plus simples, autrement dit de fluides successivement plus atténués, sans qu'on puisse assigner de terme empirique à leur atténuation.

Cependant la raison nous dit que la matière n'est pas divisible à l'infini, que sa raréfaction doit avoir un terme; s'il est facile d'affirmer la continuité de la matière, il est impossible de concilier cette hypothèse avec les phénomènes du mouvement. Par suite, aussi éloigné qu'on suppose le dernier terme de l'atténuation de la matière; celle-ci est toujours en définitive formée de volumes discontinus. L'étude de la lumière et de l'électricité, nous a conduit à regarder comme infiniment probable que l'éther n'est autre que la matière elle-même, parvenue au plus haut degré de ténuité, à cet état de rareté extrême que l'on nomme état atomique. Par suite, tous les corps ne seraient en réalité que des agrégats des atomes mêmes de ce fluide.

Mais ce n'est là qu'une hypothèse, et rien n'empêche qu'il y ait deux ou même plusieurs espèces d'atomes

primitifs, les uns qui constituent l'éther, les autres qui forment les corps pesants. Que l'on adopte cette manière de voir ou la précédente, toujours est-il qu'on est forcé de reconnaître les corps comme composés de molécules distinctes. Cette doctrine n'a rien que de très-rationnel, en outre elle découle spontanément de tous les faits observés ; cependant elle a été vivement attaquée, si bien que nous croyons nécessaire de montrer qu'elle est en parfait accord avec l'observation. Or, l'optique et la mécanique sont impuissantes à nous donner les moyens d'asseoir notre décision, et c'est à la chimie qu'il faut demander les données nécessaires pour établir nos raisonnements.

Quand les chimistes eurent reconnu que les corps hétérogènes se combinent toujours suivant des *proportions déterminées*, ils admirent bien vite que la matière était composée de corpuscules différents les uns des autres par le volume et par le poids; lesquels se combinaient entre eux en nombre toujours très-simple et suivant des rapports peu nombreux, spécialement dans les combinaisons minérales inorganiques. Ces corpuscules furent nommés par la plupart des chimistes atomes, et cela uniquement pour la simplification du langage, car ils regardaient leur division comme possible et ils se servaient du même mot pour désigner ceux qui manifestement étaient composés. Certains savants plus scrupuleux, voulant éviter l'antilogie des termes, abandonnèrent le nom d'atome et lui substituèrent celui d'*équivalent*, lequel était indépendant de toute idée théorique et représentait seulement le rapport des poids suivant lesquels les substances se combinent et *se substituent l'une à l'autre d'une façon équivalente*. Théoriquement l'équivalent défini et multiple n'est explicable qu'en supposant la matière composée de centres distincts et simples. Que ces centres soient physiquement divisibles ou non, toujours est-il que, pour nos moyens d'action, ils sont tout à fait insécables. On croit

assez généralement que l'on outrepasse les justes limites de la théorie en s'élevant des équivalents aux atomes, mais c'est à tort; le fait d'équivalence est purement une donnée expérimentale, et la constitution atomique est la déduction logique de ce même fait. L'expérience, qui a pu prononcer sur le premier point, ne pourra jamais rien décider relativement au second, parce que l'œil ne verra jamais les atomes, de même que les doigts ne les toucheront jamais. Du reste, la loi des proportions définies n'est pas la seule qui mérite de fixer notre attention ; et nous avons déjà dit (liv. I, ch. XIII), que la loi des chaleurs spécifiques prouve de la façon la plus péremptoire que, non-seulement les corps sont formés suivant des proportions définies, mais que leurs atomes élémentaires ont une capacité de mouvement thermique déterminée, et la même remarque convient encore aux équivalents électriques.

Aux faits primitivement connus par les chimistes s'en sont ajoutés d'autres, découverts depuis peu, qui ont apporté un nouvel appui à la théorie atomique. C'est ainsi qu'un examen comparatif des poids équivalents des diverses substances conduisit le docteur Prout à les considérer tous comme des multiples de l'équivalent de l'hydrogène. La loi de Prout permettait de calculer les nombres proportionnels des corps simples avec toute l'exactitude qu'exigeaient les calculs de la chimie industrielle, et même ceux des analyses assez délicates. Mais Berzélius, déterminant à nouveau les poids des équivalents avec toute la précision qui caractérise son œuvre scientifique, reconnut que ces valeurs n'étaient pas exactement multiples les unes des autres.

De là deux vues systématiques diamétralement opposées sur les conditions élémentaires de la matière [1]. Pour Berzélius, chacun des corps simples de la chimie minérale est

[1] Dumas, *C. R.*, t. XLV, p. 711, ann. 1857.

un être distinct tout à fait indépendant des autres; les molécules des divers éléments n'ont d'autres propriétés communes que celles qui appartiennent à la matière en général, savoir : stabilité, immutabilité, inertie, etc., et il y aurait autant de matières distinctes que d'éléments chimiques. Or, cette théorie elle-même peut, à la rigueur, conduire à assigner aux corps une constitution purement dynamique, c'est-à-dire à les envisager comme un agrégat de forces sans suppôt matériel. La relation trouvée par Prout permet, au contraire, de regarder les corps comme formés par la condensation d'une matière unique, l'hydrogène, par exemple, en supposant vraie l'exactitude de la loi et l'unité de poids bien choisie, ou autre élément dont l'hydrogène serait un multiple lui-même.

De plus, comme certains corps doués de propriétés différentes, ont des équivalents égaux, on est conduit à admettre que des quantités égales de cette matière unique pourraient constituer des éléments de même poids, mais ayant des propriétés dissemblables, à cause de la diversité d'arrangement des parties constituantes. Quant aux corps, dont l'équivalent est multiple de celui d'un autre, ou égal à la moyenne des valeurs appartenant à deux autres, rien n'empêche de regarder leur molécule comme formée de deux demi-molécules de ces derniers.

Enfin, on reconnaît aisément que plusieurs équivalents minéraux peuvent être formés, suivant des lois semblables à celles trouvées pour les radicaux des composés organiques. De telle sorte que la théorie de Prout assimile les prétendus radicaux simples de la chimie inorganique aux radicaux organiques, dont la composition est parfaitement reconnue; les premiers différant des seconds seulement par une stabilité infiniment plus grande, et résistant à cause de cela à tous nos procédés d'analyse.

La question ramenée à ces termes a été examinée par Dumas; des expériences rigoureuses lui ont montré que la

loi de Prout se vérifiait constamment, sauf deux exceptions présentées par le chlore et le cuivre; les nombres équivalents de ces deux corps simples sont fractionnaires, on trouve peur le chlore 35,5, et pour le cuivre, un nombre compris entre 31 et 32. On a signalé en outre des irrégularités dans l'équivalent de quelques autres substances, mais comme il s'agit là de corps très-rares, on peut croire à des erreurs d'expérience, tandis que dans le cas des deux corps simples, dont nous avons parlé, le doute n'est pas possible ; la loi de Prout est en défaut. Or, l'illustre chimiste pense que ces anomalies n'autorisent pas à rejeter la loi; elles indiquent seulement qu'il faut abaisser le poids pris comme unité, et modifier comme il suit la formule de Prout; tous les corps simples ont un poids atomique multiple de celui d'un certain corps jusqu'ici inconnu, et dont l'équivalent serait seulement 0,5, c'est-à-dire la moitié du nombre proportionnel de l'hydrogène. Ainsi la loi de Prout est vraie en elle-même, mais il convient de changer l'unité adoptée tout d'abord. Comme il est peu probable que l'atome d'hydrogène soit l'atome simple de la première création, on n'hésitera pas à admettre la modification apportée par Dumas à l'énoncé primitif. Que l'hydrogène ne soit pas l'atome primitif, on pourrait le déduire de ce qu'il a réellement tous les caractères des métaux. Berzelius avait déjà obtenu l'alliage du mercure avec l'*ammonium*. Graham vient d'obtenir l'alliage en proportions définies du palladium avec l'hydrogène, qu'il appelle *hydrogenium*.

Passons au second point; un coup d'œil jeté sur la table des poids atomiques nous apprend aussitôt que, pour plusieurs corps leurs valeurs sont multiples les unes des autres, ou égales à la moyenne de deux ou plusieurs autres. Le manganèse et le chrome ont le même équivalent, celui de l'oxygène est à celui du soufre : : 1 : 2. Les métaux alcalins donnent lieu aux rapports les plus cu-

rieux, et l'amplitude des variations est telle, que l'on est autorisé à regarder les relations comme vraies. L'équivalent du sodium est la moyenne de ceux du potassium et du lithium $\frac{39+7}{2}=23$. En doublant le poids proportionnel du sodium et en l'ajoutant à celui du potassium, on a le nombre correspondant au rubidium $46+39=85$, etc.

Celui qui voudrait se contenter de simples approximations, trouverait de nombreuses relations numériques de ce genre, mais sans profit pour la vérité. En cela, il faut agir avec la plus grande circonspection, sans quoi on tombe dans de puériles combinaisons de chiffres. Toutefois, une parenté si étroite unit les corps de certains groupes, que les analogies de propriétés se poursuivent dans les corps nouvellement découverts qui viennent grossir les familles déjà établies; citons comme exemple le cas des métaux alcalins. Pour les faire rentrer dans la loi de Dulong et Petit, c'est-à-dire pour faire en sorte que les chaleurs spécifiques de leurs atomes égalent celles des autres métaux, on avait été obligé de réduire de moitié les poids proportionnels qui leur étaient attribués : or le thallium, métal obtenu tout récemment, n'échappe pas à cette particularité[1].

Par contre, le chlore, le brome et l'iode présentent une exception remarquable. L'analogie la plus grande règne entre ces trois métalloïdes, et cependant leurs équivalents ne sont pas des multiples exacts les uns des autres, car il a été reconnu que le nombre proportionnel du brome n'est pas la moyenne de ceux du chlore et de l'iode comme on l'avait pensé d'abord. Devra-t-on dire, pour cela, que ces substances, dont la similitude est frappante, ne présentent aucun rapport réciproque de poids atomique, et par suite de composition? Non assurément, et la difficulté a été

[1] Dumas, *loc. cit.*

résolue par Dumas, en faisant une étude comparative trés-rigoureuse des dérivés, formés par les radicaux organiques unis à ces métalloïdes.

Vu l'importance de cette question, il est utile de donner ici un court extrait de son travail.

Une des familles les mieux caractérisées de la chimie organique est celle des éthers; éthers méthylique, éthylique, propylique, butylique, etc., leur composition est représentée par

$$\begin{array}{llllll} C^2H^3 = & \text{carbone } 2 + \text{hydrogène } 3 = 15 + 0 & & & & \\ C^2H^5 = & - & - & - & = 15 + 14 & = 29 \\ C^2H^7 = & - & - & - & = 15 + 2 \times 14 & = 43 \end{array}$$

vingt-deux corps de cette famille sont connus, et tous leurs poids atomiques s'expriment par 15 plus un multiple de 14, de telle sorte que la formule générale de ce poids est:

$$a + nd$$

ou bien

$$15 + n \times 14$$

Or de cette série de valeurs, tous les termes pairs diffèrent fort peu d'être doubles les uns des autres, et cependant on tomberait dans une profonde erreur, si on se laissait guider par ce caractère; puisque la véritable loi est toute autre, et que les nombres considérés forment une simple progression arithmétique dont la raison d est additive.

Un autre groupe est celui des amides dont le radical composé AzH^4 donne naissance à un grand nombre de dérivés, dans lesquels à 1, 2, 3, 4 équivalents d'hydrogène peuvent être substitués à 1, 2, 3, 4 équivalents de méthyle, et, pourvu que la somme ne surpasse pas 4, elle peut prendre la place de l'une quelconque des 4 molécules; ce qui revient, en définitive, à ajouter au radical les valeurs

de 1, 2, 3, 4 équivalents de $C^n H^n$; parconséquent la formule générale de ces composés est :

$$a + n \begin{cases} d \\ d' \\ d'' \\ d''' \end{cases}$$

en désignant par d, d, d', d'' les poids des équivalents, des divers carbures d'hydrogène appartenant à la série $C^n H^n$, Mais par la substitution, par l'arrangement des termes, il est possible d'obtenir une foule de dérivés dissemblables ; la formule algébrique des combinaisons porte à deux cent mille au moins le nombre possible des radicaux de ce genre.

Dans ce cas, le premier corps a demeure constant, mais il y en a d'autres dans lesquels il change et devient successivement $2a$, $4a$; les différences présentées par le second composant restant toujours les mêmes. Ainsi, l'étain et l'éthyle donnent la série représentée par :

$$na + n'd'$$

dans laquelle a et d' peuvent se répéter, et d' lui-même peut se changer avec un autre quelconque des équivalents d, d', d''.

Ces faits nous donnent la clef de la proportion relative du fluor, du chlore, du brome, de l'iode. Entre les poids atomiques de ces substances, savoir : 19 ; 35,5 ; 80 ; 127 existent les relations suivantes :

Fluor. . . .	$= a$	$= 19$	$= 14$
Chlore. . . .	$= a + d$	$= 19 + 16{,}5$	$= 35{,}5$
Brôme. . . .	$= a + 2d + d'$	$= 19 + 33 + 28$	$= 80$
Iode.	$= 2a + 2d + 2d'$	$= 19 + 33 + 56$	$= 127$

avec l'azote, le phosphore, l'arsenic, l'antimoine et le bismuth, on a :

Azote. . .	$= a$	$= 14$	$= 14$
Phosphore. .	$= a + d$	$= 14 + 17$	$= 31$
Arsenic. . .	$= a + d + d'$	$= 14 + 17 + 44$	$= 75$
Antimoine. .	$= a + d + 2d'$	$= 14 + 17 + 88$	$= 119$
Bismuth. . .	$= a + d + 4d'$	$= 14 + 17 + 176$	$= 202$

Le carbone, bore, silicium et zirconium donnent :

Carbone. . .	$= a$	$= 6$	
Bore	$= a + d$	$= 6 + 5$	$= 11$
Silicium. . .	$= a + 3d$	$= 6 + 15$	$= 21$
Zirconium . .	$= 3a + 3d$	$= 18 + 15$	$= 33$

Il règne quelques incertitudes sur le poids équivalent du zirconium.

Pour l'oxygène, le soufre, le sélénium et le tellure, on trouve :

Oxygène. . .	$= a$	a	$= 8$	$= 8$
Soufre. . . .	$= 2a$ ou	$a + d$	$= 8 + 8$	$= 16$
Sélénium . .	$= 5a$	$a + 4d$	$= 8 + 32$	$= 40$
Tellure . . .	$= 8a$	$a + 7d$	$= 8 + 56$	$= 64$

Ici la différence est $a = d$, de sorte que la seconde formule s'applique.

Le magnésium et les autres métaux terreux forment le groupe que voici :

Magnésium. .	$= a$	$= 12$	
Calcium. . .	$= a + d$	$= 12 + 8$	$= 20$
Strontium. .	$= a + 4d$	$= 12 + 32$	$= 44$
Baryum. . . .	$= a + 7d$	$= 12 + 56$	$= 68$
Plomb. . . .	$= 2a + 10d$	$= 12 + 90$	$= 104$

Finalement, les métaux alcalins donnent :

Lithium. .	$= a$	$= 7$	
Sodium. . .	$= a + d$	$= 7 + 16$	$= 23$
Potassium. .	$= a + 2d$	$= 7 + 32$	$= 39$
Rubidium. .	$= 3a + 4d$	$= 21 + 64$	$= 85$
Cœsium. . .	$= 4a + 6d$	$= 28 + 96$	$= 124$
Thallium. . .	$= 6a + 10d$	$= 42 + 160$	$= 202$

Il est remarquable de voir les trois derniers métaux

dont la découverte est postérieure à la théorie de Dumas, concorder si exactement avec elle.

Nous pourrions multiplier ces comparaisons et montrer que les équivalents de nombreux corps simples diffèrent les uns des autres d'une quantité constante. Exemple : le titane = 25, l'étain 59; différence 34, c'est-à-dire le double de 17, excès de l'équivalent du phosphore sur celui de l'azote. On a donc la série :

		DIFFÉRENCE.
Titane	= 25	
Étain	= 59 . . .	34
Tantale	= 93 . . .	34

De même les suivants :

Chrome	= 26
Molybdène	= 48
Vanadium	= 70
Tungstène	= 92

forment une progression arithmétique, dont la raison = 22.

Mais, dira-t-on, ce sont là des purs jeux de combinaisons dont tout le secret réside dans le choix bien entendu d'une unité; et, le poids équivalent des métalloïdes et des métaux variant de 1 à 176, on peut facilement trouver des rapports parmi les diviseurs du dernier nombre. Cette objection n'est pas soutenable, car 1° on ne compare pas seulement les extrêmes de la série, mais aussi les termes intermédiaires dont les rapports sont exprimés par des nombres moins grands; 2° l'extrême rigueur apportée, par les chimistes modernes, à la détermination des poids atomiques ne permet pas de taxer d'erronées les relations que l'on découvre entre ces valeurs ; 3° l'analogie des propriétés physiques et chimiques des corps, compris dans les groupes signalés ci-dessus, porte d'elle-même à soupçonner entre leurs molécules quelque rapport constant dans la structure. Cette analogie subsiste dans les radicaux

organiques, comme dans ceux d'origine minérale, et le premier constituant a semblé être celui qui détermine le genre du groupe, tandis que l'autre, c'est-à-dire la différence, ne détermine que l'espèce. Qui ne voit des types homologues dans le fluor, l'iode, le brome, le chlore, substances désignées, à juste titre, sous le nom générique de corps halogènes? Qui ne serait frappé de la parfaite conformité de fonctions chimiques des métaux alcalins ou bien encore des corps acidifiants, tels que le sélénium, le soufre, l'oxygène et le tellure, et ainsi de suite? Concluons donc, avec le savant auteur dont le travail nous a servi de guide, que :

1° *Les équivalents des corps simples appartenant à une même famille naturelle, forment toujours une progression arithmétique, à la façon des radicaux de la chimie organique.*

2° *La raison de cette progression constante est quelquefois remplacée dans certains termes de la progression par une raison équivalente, circonstance qui dissimule la simplicité de la loi* [1].

Les faits une fois observés, le chimiste s'arrête, et il a raison; mais le philosophe s'empare de ces résultats et s'efforce de les interpréter et de les généraliser. Pour nous, nous en tirons cette conséquence inévitable, que les corps regardés jusqu'ici comme simples, sont réellement des agrégats très-compliqués d'autres éléments complexes, mais finalement réductibles en une seule matière.

Cette doctrine est encore appuyée par les récents travaux de Tyndall, dont nous avons déjà parlé. D'après ce physicien, les gaz simples, même lorsqu'ils sont mêlés dans les proportions voulues pour donner lieu à certaines combinaisons, absorbent la chaleur avec infiniment moins d'intensité que ne le font les gaz composés, différence qui tient

[1] Dumas, *loc. cit. C. R.*, XLV.

à la complication de leurs molécules. Les molécules des gaz simples étant moins anguleuses et moins complexes que celles des autres, l'éther vibrant éprouve au milieu d'elles un moindre frottement. Ce résultat s'accorde parfaitement avec la faible valeur du poids atomique, pour nous montrer les gaz simples comme formés par des assemblages atomiques extrêmement simples. Au contraire, les molécules organiques, dont le pouvoir absorbant est très-marqué, sont formées par un très-grand nombre d'atomes élémentaires. Les parfums qui sont le plus ordinairement des huiles essentielles, ont une puissance d'absorption énorme.

Puisque nous voyons ces molécules très-complexes entrer en combinaison comme les plus élémentaires, il n'y a donc de ce côté aucune impossibilité à croire que les molécules élémentaires elles-mêmes ne sont pas simples. Les deux classes de molécules diffèrent en ce que dans celle de la seconde, la réunion des atomes est tellement établie, qu'elle ne cède pas à nos moyens de décomposition. Mais, si l'on veut regarder que ces moyens se réduisent en définitive à la mise en jeu du mouvement moléculaire calorifique ou électrique, aidé par les forces mêmes qui constituent l'affinité, on reconnaît que la différence qui sépare les molécules dites simples, et celles reconnues comme composées, se réduit à ce que les unes et les autres ne résistent pas également à l'agitation thermique. Tandis que les combinaisons élémentaires peuvent passer d'un extrême de température à l'autre sans se détruire, il n'en est plus ainsi des molécules surcomposées d'origine organique, qui ne peuvent supporter une variation de chaleur même assez faible. Et cela, précisément à cause de leur complication, car plus le nombre des corpuscules composant un système est considérable, plus est grande l'amplitude des variations que peut éprouver une molécule dans sa forme et son état d'agré-

gation, plus faible devient par suite sa résistance à la décomposition, laquelle souvent aura lieu par un simple changement dans l'ordre des parties, sans qu'aucune d'entre elles ne se sépare de la masse totale.

En effet, lorsqu'une grande quantité de corpuscules sont réunis, il faut ténir compte non-seulement de leur nombre, mais aussi de leur disposition; car il arrive souvent que sans éprouver de changement dans sa masse le composé varie par suite de la transposition de ses parties constituantes. De même que le dessin d'un échiquier dont les carreaux sont de deux ou plusieurs couleurs différentes, se prête à des milliers de combinaisons : de même un nombre déterminé de corpuscules hétérogènes, en s'assemblant de diverses manières, peut donner naissance à une foule de composés doués des prepriétés les plus dissemblables. La chose est bien connue des chimistes; ils savent que plus est élevé le degré de combinaison, plus abondent les corps *isomères*, spécialement parmi les combinaisons organiques. Cela se voit clairement dans les figures de M. Gaudin.

Ajoutons à cela l'impossibilité géométrique de disposer dans l'espace à trois dimensions des points réciproquement équidistants dans tous les sens, d'où il suit que de tels systèmes solides doivent avoir une densité plus grande, suivant telle ou telle direction. On comprend maintenant à quel degré de variété peuvent atteindre les combinaisons obtenues avec une quantité constante de matière, suivant le mode de groupement, de condensation, etc.

Par ces diverses considérations se trouve justifiée notre théorie de la constitution de la matière. On peut regarder celle-ci comme un agrégat de systèmes de plus en plus simples; la molécule d'un composé organique nous représente un système d'ordre supérieur très-compliqué, où les systèmes composés jouent le rôle d'éléments : dans la chimie minérale la molécule dite élémentaire appartient

à un ordre inférieur : mais rien ne dit que la série a sa fin aux termes que nous appelons corps simples ; seulement, vu notre impuissance à descendre la série jusqu'à l'infini, nous appliquerons à ces substances ce qui doit s'entendre des derniers groupes d'atomes proprement dits.

Dans les systèmes atomiques, il faut considérer, en outre, la vitesse de projection initiale, en vertu de laquelle la forme de leurs orbites, l'amplitude de leurs excursions et le volume de l'espace occupé peuvent être notablement différentes. Il se pourrait très-bien que nous ayons là, comme le dit Graham, la clef de la diversité des poids équivalents chimiques. En outre, des volumes égaux peuvent, lorsqu'ils se réunissent, conserver en totalité ou en partie leur mouvement de translation, changer celui de rotation, et ainsi faire varier la densité de l'élément[1].

Voilà à quelle idée générale de la constitution des corps nous amène l'étude comparative des phénomènes chimiques, combinée à celle de la chaleur, et de toutes les manifestations générales de la matière. Dans notre ensemble théorique, les hypothèses n'ont rien d'arbitraire, et sont, du reste, appuyées sur des preuves nombreuses.

Les groupes atomiques de complexité décroissante, qui constituent très-certainement les divers corps de la nature, ont, avons-nous dit, pour derniers termes, les molécules des substances nommées *éléments chimiques*. Or rien n'empêche que ces molécules ne soient elles-mêmes d'ordre supérieur. Aussi, admettons-nous cette limite seulement parce que nous ne pouvons suivre la série jusqu'à l'infini. Quoi qu'il en soit, il est parfaitement rationnel *de regarder la matière comme composée d'atomes distincts et originairement séparés*.

La théorie atomique, loin d'être absurde et de ne pas se prêter à l'explication des phénomènes, comme certaines

[1] Graham, *Proceedings*, R. soc. London, XII, p. 621.

personnes le prétendent, est, au contraire, celle qui découle directement des faits. De plus, elle ne dépend en rien de la théorie des forces qui assemblent les atomes, car elle subsiste, soit qu'on attribue le mouvement des atomes, les uns vers les autres, à des causes occultes, à des puissances internes, soit qu'on les suppose réunis par l'action extérieure d'un milieu en mouvement. Les doter de forces abstraites est certainement chose facile, mais nous avons vu, plus d'une fois, à quelle complication conduit un pareil système, et quel nombre prodigieux de forces il faut imaginer. Enfin, pour tout dire, on arrive de la sorte à attribuer aux atomes une espèce d'intelligence, qui leur permet de discerner s'ils doivent agir ou non, ou à leur donner implicitement une faculté de perception qui les avertit de la présence des éléments susceptibles d'être attaqués par eux, hypothèses évidemment absurdes. De plus, il reste toujours la grande question : en quoi consiste cette force abstraite d'affinité? Pourquoi ne s'épuise-t-elle jamais? Comment se fait-il qu'étant sans cesse active et prête à agir sur tous les corps, lorsqu'on lui en présente deux à la fois, elle s'attaque à l'un et pas à l'autre ; y a-t-il là un choix intelligent? Nous pourrions facilement multiplier nos questions, mais en vain, assurés que nous sommes qu'elles resteraient sans réponse. Il est donc préférable de montrer comment il est possible de concevoir les forces de cohésion comme dérivant du mouvement dont la matière est animée.

CHAPITRE III

DES FORCES ATTRACTIVES EN GÉNÉRAL : COMMENT ELLES PEUVENT ÊTRE PRODUITES PAR LES MOUVEMENTS MÉCANIQUES.

Pour nous, les corps sont des agrégats d'atomes probablement homogènes à l'origine, et qui, en se groupant de

diverses manières, forment les molécules dites élémentaires. Cette hypothèse est extrêmement probable; toutefois, il n'est pas indispensable de la prendre comme base de nos conclusions futures. Outre ces agrégats, c'est-à-dire les atomes grossiers, il existe une matière plus atténuée et subtile que nous nommons éther. Pour nous, elle est constituée par les atomes de premier ordre; ceux qui ne partagent pas notre manière de voir admettent que c'est une matière *sui generis*. Que l'on soit partisan de l'émission ou des ondulations, on est forcé d'admettre l'existence de ce milieu, car en acceptant l'émission, il faut reconnaître que les émanations du nombre infini des corps radiants qui traversent incessamment l'espace le remplissent d'une quantité énorme de molécules en répulsion réciproque, à cause de leur vitesse prodigieuse, ce qui constitue un véritable fluide. Ainsi, les deux théories, bien que différentes par l'énoncé, se réduisent, en somme, à une seule et même [1].

Étant donné qu'il existe un milieu autre que la matière palpable et pesante, demandons-nous s'il ne serait pas capable de produire des attractions, alors même que paraissent manquer ces changements d'équilibre qui constituent l'état électrique; car, dans ce cas, nous pouvons répondre avec certitude par l'affirmative.

En effet, l'étude de l'électricité a prouvé que *toute rupture d'équilibre dans l'éther, qu'elle survienne par condensation ou par raréfaction, donne lieu à des attractions.* Ce résultat expérimental servant de point de départ, il n'est plus impossible que tous les phénomènes de la nature puissent s'expliquer aisément par des différences d'équilibre éthéré dans les molécules des corps; ces différences, du reste, sont clairement indiquée par toute l'électro-chimie. De cette façon, les actions moléculaires

[1] Voy. ci-dessus, liv. II.

ne seraient qu'un effet de la disposition de l'éther autour des molécules qui constitue l'état passager des corps dit état électrique, mais qui se trouverait un état permanent dans leur structure.

Après cela, il n'est plus impossible que les attractions planétaires se produisent par un mécanisme semblable, et leur cause, si longtemps cherchée, pourrait bien être la diffusion inégale de l'éther dans l'espace; car, selon toute vraisemblance, ce fluide affecte autour des masses entières des variations de densité analogues à celles qu'il présente autour de chacune des molécules appartenant à ces masses. En un mot, tout se passerait comme dans les corps électrisés, à cette différence que la variation de densité est accidentelle dans ceux-ci, et qu'elle est permanente et nécessaire dans tous les corps. Nous voilà conduit rationnellement à rattacher la gravitation à l'électricité, rapprochement qui n'est pas nouveau, car il a été tenté par plusieurs physiciens.

Nous pourrions donc admettre le fait comme démontré et passer outre; mais il est nécessaire de développer ces idées avec soin et d'expliquer de quelle façon l'équilibre de l'éther vient à être troublé autour des molécules. Ce point une fois établi, le reste s'en déduit nécessairement. Or, à cela rien d'impossible, attendu les propriétés de la matière, et spécialement le mouvement qui anime ses dernières particules. Il convient d'ajouter du reste que la théorie, dont nous allons esquisser les traits principaux, n'est pas la seule à l'aide de laquelle on puisse concevoir ce résultat, et il n'est pas impossible d'en imaginer d'autres.

Premièrement, voici quelques réflexions générales utiles, à présenter dès l'abord. Nous avons dit, ailleurs, combien il était impossible de concevoir ce que l'on appelle une force attractive, quand on prend ce mot dans son acception rigoureuse, c'est-à-dire pour représenter un

principe actif, siégeant à l'intérieur des molécules et agissant sans aucun intermédiaire à travers le vide absolu. Cela revient à admettre que les corps agissent à distance les uns sur les autres, c'est-à-dire là où ils ne sont pas : hypothèse absurde, aussi absurde quand il s'agit de distances énormes que lorsqu'on parle de distances fort petites.

Mais, peut-être, en retournant notre objection contre nous-même, on dira que l'action ne peut non plus avoir lieu entre les corps que nous prétendons être en contact, car même ceux-ci agissent là *où ils ne sont pas*. Un corps qui par le choc tend à en mettre un autre en mouvement n'est certainement pas là où il tend à aller, et par suite agit où il n'est pas. Raisonner ainsi, c'est vouloir s'abuser par un sophisme. En effet, il est dit dans notre argumentation, agir où il n'est pas, et sans *aucun intermédiaire*. Nous concevons très-bien, en effet, la possibilité d'une action à distance dans le cas d'un intermédiaire, mais il n'en est plus de même quand l'intermédiaire manque. 2° Quand (fig. 55) un corps A en choque un autre B, au moment où les surfaces parviennent au contact, l'un chasse l'autre en vertu de l'impénétrabilité, et à la surface du contact le corps existe certainement. 3° Si l'on insiste en disant que cela n'est pas nécessaire, nous l'accorderons volontiers ; car, loin d'admettre que ces lois soient de nécessité métaphysique, nous les acceptons comme lois empiriques et entièrement libres dans leur Cause première. La différence capitale qui sépare la communication du mouvement au contact de celle qui se fait à distance, c'est que, dans ce dernier cas, le mouvement est transmis par quelque chose d'interposé, et cela nous suffit. Peut-être niera-t-on le contact, mais nous l'admettons en donnant à ce mot le sens que nous avons plusieurs fois expliqué dans le cours de cet ouvrage.

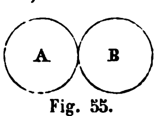


Fig. 55.

A la fin du second livre, nous avons signalé déjà

les embarras sans nombre auxquels on arrive en envisageant les forces comme des *tendances*. Loin de diminuer, les difficultés ne font que s'accroître, car maintenant il faut supposer les forces agissant tantôt dans un sens, tantôt dans un autre. Ces tendances sont donc de pures imaginations qui s'évanouissent une à une devant les progrès incessants de la science[1].

A toutes ces difficultés théoriques et physiques, s'ajoute une circonstance qui porte le dernier coup à la doctrine que nous réfutons, c'est le manque complet de preuves directes. En effet, les auteurs, au moins le plus grand nombre, admettent qu'étant supposé deux molécules dans un espace vide, elles ont la propriété de s'attirer, et de se précipiter l'une vers l'autre, suivant certains rapports, etc.; et ils regardent cette propriété comme une propriété absolue de la matière. Or une telle assertion ne s'appuie sur aucun fait. D'abord, parce que nous ne pouvons observer l'action de *deux seules* molécules, et encore moins observer cette action dans le vide *absolu*. Tout ce que nous voyons s'accomplit entre des masses finies, composées, et de plus au sein d'un milieu : si bien que le principe fondamental de l'attraction matérielle ne repose nullement sur des données expérimentales. Cette conception a pris naissance ainsi. Voyant les corps célestes tendre les uns vers les autres ; et, d'autre part, ces corps étant sensiblement sphériques, par une fiction mathématique, on a supposé

[1] Un exemple rendra notre pensée plus clairement. Chacun sait que les plantes tendent vers la lumière. Cette tendance mystérieuse est-elle une propriété de la plante, dans le véritable sens du mot? La réponse est facile : le tissu végétal, exigeant pour se développer l'action chimique des rayons lumineux, la plante croît du côté de la lumière, si bien qu'aux yeux de l'observateur superficiel, la plante cherche la lumière, tandis que réellement c'est la lumière qui fait la plante. Un autre fait, bien que d'un genre tout différent, se peut comparer à celui-ci. On sait que les efflorescences salines se développent sur une surface là où elle est le mieux en rapport avec l'air libre. Faut-il dire pour cela que le sel cherche la sécheresse?

toute leur masse condensée à leur centre; on les a réduit, en un mot, à des atomes ou molécules. Mais ces mouvements ne s'accomplissant pas dans un espace absolument vide, et il reste toujours à se demander s'ils ne sont pas causés plutôt par une action impulsive extérieure, que par un principe résidant à l'intérieur des corps; aussi les anciens physiciens et Newton lui-même ont-ils laissé cette question en suspens. Les mathématiques ne peuvent ici rien décider, elles enseignent que deux corps se rapprochent avec une vitesse qui est dans un certain rapport avec les distances parcourues, c'est là une loi empirique, elle ne fait rien savoir de la cause et ne dit pas si c'est une impulsion ou une autre action. Donc le cas de *deux molécules isolées*, *agissant l'une sur l'autre dans le vide absolu*, *est une pure fiction géométrique*. A ceux qui disent qu'il s'agit là d'une loi primitive, d'un acte direct de la volonté de Dieu, nous répondrons que par de tels moyens on tranche toutes les questions; mais le physicien agit autrement, il cherche si vraiment cela est un acte primitif et direct de la volonté suprême, ou seulement un acte médiat.

Au contraire, en réalité, dans la nature, les corps qui agissent réciproquement à distance étant toujours immergés dans un milieu, quiconque, sans se laisser fourvoyer, suit la voie tracée par la logique, cherche à expliquer la tendance incessante des corps, les uns vers les autres, par une action du milieu ambiant. Disons plus, en raisonnant d'après les faits, on arrive à conclure que, contrairement au principe fondamental de l'attraction, deux particules matérielles isolées doivent se repousser bien plutôt que s'attirer. Ne voit-on pas, en effet, la force expansive augmenter à mesure que la matière atteint un plus grand état d'atténuation, et son intensité acquérir un maximum là où la matière est plus divisée, comme on l'observe lorsqu'elle traverse les substances poreuses?

Quand la science n'admettait que l'existence des milieux

tangibles, il était permis de croire au vide des espaces planétaires; mais puisque aujourd'hui il est prouvé qu'un milieu peut exister et même produire des effets puissants malgré qu'il ne soit pas perceptible directement par nos sens, nous avons le droit de poser comme principe démontré que l'attraction exercée par un corps sur un autre, ne s'observe jamais entre deux atomes isolés, et toujours entre les systèmes d'atomes et au sein d'un milieu. Il reste à faire voir que c'est ce milieu lui-même qui détermine ces actions.

Nous supposerons le milieu composé d'atomes isolés, indépendants, impénétrables et mobiles; ces deux dernières conditions nous dispensent d'admettre, dans les atomes, soit une d'élasticité intérieure, soit une force répulsive ou toute autre. Cela posé, deux hypothèses sont possibles, relatives à l'état des atomes : 1° ou ils sont en repos absolu et privés de mouvement rotatoire; 2° ou ils sont doués soit d'un mouvement de translation et de rotation, ou même d'un simple mouvement de rotation. Examinons d'abord ce qui se passe dans un tel milieu au moment d'un choc dû à une cause quelconque, et qui peut être une molécule ou un atome du milieu lui-même animé d'une impulsion excessivement grande.

Puisque, d'après la première hypothèse, les éléments du milieu sont en repos et ne présentent aucune élasticité, il est clair que le mouvement se communiquera d'après les lois de la transmission dans les corps *durs*. Il se fera une translation simultanée de la masse qui exerce le choc, et de celle qui le reçoit, et cette translation s'étendra jusqu'aux dernières limites du milieu, sans autre effet que le déplacement d'une portion de la masse dans une direction déterminée qui laissera en arrière un vide partiel. Que si on veut supposer les atomes doués d'élasticité, l'effet se réduira à une vibration par le moyen de laquelle la masse qui produit le choc communique sa vitesse au milieu ambiant,

puis revient en même temps au repos et rien de plus. Cette hypothèse sur la constitution du milieu ne permet pas d'expliquer les attractions.

Examinons la seconde hypothèse. Si les éléments du milieu sont animés de mouvement rotatoire, le choc ne donnera pas naissance à un mouvement de translation rectiligne, mais à un mouvement se répandant sur une certaine étendue autour du centre d'ébranlement. En effet le choc s'exercera généralement autre part que sur le pôle de rotation, et sera oblique à l'axe. En conséquence, par la composition du mouvement rotatoire avec celui de translation appartenant à l'atome qui exerce le choc, une résultante oblique prendra naissance ; cet atome rebondira sur le premier, puis heurtera un autre plus ou moins voisin puis de celui-ci ; il sera renvoyé contre un troisième, et ainsi de suite. L'atome en mouvement agira d'abord de même qu'un corps élastique lancé au milieu d'autres également élastiques, mais de plus, suivant son incidence, il se fera des mouvements de *réflexion* qui équivaudront aux effets d'élasticité : des mouvements de *progression* par lesquels les atomes continuant à suivre leur direction première dilateront le milieu : enfin des mouvements de *conversion* positive ou négative, selon que la rotation conservera le même sens ou non. Ainsi, par l'effet de ces chocs, le centre de l'atome pourra revenir en arrière, ou être précipité en avant, ou changer de direction, et dans chacun de ces cas sa vitesse pourra augmenter ou diminuer [1]. D'où il suit que l'atome ne perdra pas toute sa force au premier choc, il se mettra peu à peu à décrire un mouvement gyratoire, et, les atomes voisins participant à l'agitation, une dilatation et un changement d'équilibre prendront naissance et s'étendront autour du centre d'ébranlement, dans tous les sens, sur une étendue plus ou moins

[1] Voy. liv. I, ch. VI.

grande. C'est là ce que nous nommons la sphère d'action.

Et comme chaque atome est à son tour capable de choquer les atomes voisins, il devient par là un véritable centre d'ébranlement : ainsi le mouvement se propage de la première à une seconde couche sphérique, puis de celle-ci le mouvement passe à une troisième, et ainsi de proche en proche. On voit aisément la différence qui sépare ce mode de propagation de celui qui aurait lieu dans un milieu simplement élastique, car dans ce dernier les *progressions* et les *conversions* manquant, il n'y a pas, en réalité, dilatation permanente, mais seulement retour complet à l'état premier, de telle sorte que, l'onde une fois passée, tout retombe au repos. Dans le cas où l'ébranlement se répète sans interruption parce que le centre d'agitation agit d'une façon permanente, un milieu simplement élastique ne fait que vibrer, tandis que si, comme nous le supposons, les atomes sont en rotation, il se produit une dilatation qui, à *une certaine distance*, peut donner naissance à une sphère agitée à l'intérieur de laquelle la densité est décroissante du centre vers la circonférence.

Évidemment un centre, alors même qu'il est unique, pourvu qu'il soit animé d'un mouvement suffisamment énergique et durable, peut déterminer l'agitation d'un milieu illimité et le modifier de façon à ce que la densité, minimum au centre, aille en croissant à mesure que l'on s'approche de la circonférence. L'intensité du choc s'affaiblit en proportion de la masse ébranlée, et la dilatation varie en raison inverse du carré des distances; en vertu de la loi bien connue que la masse des couches sphériques mises en mouvement augmente suivant cette même proportion. De tels effets pour se produire, remarquons-le bien, n'exigent pas que les atomes soient sphériques, car la théorie des rotations nous enseigne que la forme extérieure des corps qui s'entre-choquent n'exerce aucune influence sur les résultats observés, que tout dé-

pend de la disposition de leurs axes principaux d'inertie ; et qu'enfin un corps de figure quelconque peut toujours être remplacé par un ellipsoïde régulier. Admettons donc comme démontré qu'un point animé d'un mouvement continu engendre autour de lui une atmosphère de densité non uniforme, décroissante vers le centre.

Imaginons maintenant qu'à côté du premier centre d'ébranlement A, par exemple (fig. 56), il s'en développe un autre B, situé nécessairement à l'intérieur de la sphère d'action de A, puisque celle-ci, avons-nous dit, peut s'étendre jusqu'à l'infini. Évidemment la quantité de matière et par suite la résistance au mouvement que rencontre la parcelle ou l'atome B cessera d'être égale partout; elle est plus grande vers la partie extérieure et plus faible en dedans; si bien que le long de la ligne BA, qui unit les deux centres, la masse et la résistance est minimum, et par suite un plus grand espace est parcouru par l'ébranlement parti de B, quand il exerce un choc du côté de A, que quand le choc se fait sentir dans la direction opposée. D'où il résultera un transport de B vers A, et, comme cette facilité, plus grande au mouvement, dure autant que l'agitation centrale, les deux centres se rapprocheront jusqu'à ce qu'ils soient arrivés au contact, ou plutôt jusqu'à ce que l'un d'eux agisse par choc direct sur l'autre. A ce moment commence une réaction réciproque, d'abord entre les atomes A et B, puis entre ces atomes et le milieu ambiant, lequel présente dès lors un centre d'action dont l'énergie est double de celle qu'il avait auparavant, ce qui produit des effets que nous examinerons plus loin. De cette analyse il ressort que deux atomes ou deux molécules en mouvement

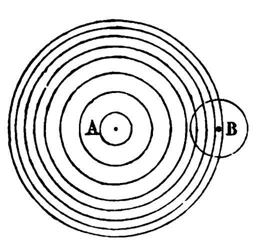


Fig. 56.

au sein d'un milieu constitué, comme il a été dit, *ont une tendance réciproque au rapprochement*, non en vertu d'une force intérieure, mais à cause de l'inégale résistance au mouvement que présente le milieu dans les divers sens, dès l'instant où le centre agissant n'est plus unique. Dans ces conditions, il se produit ce que l'on appelle une attraction. Toutes les causes capables d'augmenter l'intensité du mouvement modifieront nécessairement les effets de cette attraction apparente.

Quand il existe un grand nombre de centres d'ébranlement, la résultante finale dépend de leur somme, de leur distribution, de leurs mutuelles distances et les règles ordinaires de la mécanique permettent de la déterminer. Le géomètre pourra ne pas tenir compte du mécanisme suivant lequel s'opère le rapprochement des atomes; accepter ce mouvement comme un fait primaire se manifestant toujours suivant une même loi, et lui appliquer dès lors les méthodes de calcul usitées dans le cas de la force attractive.

Supposons actuellement la matière pondérable composée de *centres de mouvement immergés dans un milieu*. Il en résultera forcément que *chaque centre tendant à se rapprocher des autres, une véritable force d'attraction se produit partout où ces centres existent*. Cette tendance au rapprochement est le résultat des variations qu'éprouve la densité du milieu autour des deux molécules en présence. Ainsi nous sommes conduit à donner des attractions une théorie semblable à celle que nous avons proposée pour les corps électrisés.

On se tromperait beaucoup si l'on nous objectait que, d'après notre manière de voir, chacun des atomes de l'éther devrait se constituer centre d'attraction; car ce fluide étant formé par des atomes égaux et isolés, tous en rotation ayant une masse et une vitesse égales partout, l'ébranlement ne peut donner naissance à une dilatation

définie dans aucun sens, parce qu'il n'y aura nulle part un centre d'action prédominante. Mais le contraire arrivera là où il y a un centre de masse ou de vitesse plus grandes. Tel est le cas des molécules pesantes, et celui où deux et plusieurs atomes, réunis ensemble, agissent comme une masse unique.

L'examen du cas théorique sur lequel nous nous sommes arrêtés sera complet si nous disons comment on doit concevoir ces centres d'ébranlement. Sur ce point deux hypothèses sont possibles.

1° Ou ce sont des points de matière primitive dont la masse, le volume, la vitesse, sont plus grandes que dans les autres parties; dont le mouvement est un attribut naturel au même titre que leur propre existence; ces centres sont précisément ce que nous nommons atomes pondérables.

2° Ou bien un petit nombre d'atomes éthérés se groupent de façon à équivaloir à une masse unique, leur réunion n'étant qu'un effet de leur inertie. Supposons, en effet, que quelques atomes possèdent une égale vitesse de translation et de rotation : une fois réunis, ils continueront à se mouvoir ensemble; et cet agrégat de particules parfaitement distinctes agira comme une masse simple. Ce sont de tels centres dont la masse est multiple de celle des autres atomes isolés qui constituent très-vraisemblablement les molécules de la matière pondérable. Celle-ci ne différerait donc pas en substance de l'éther. Dans une molécule, les atomes ne sont pas nécessairement en contact absolu, il suffit d'un synchronisme exact de leurs mouvements, qui donne à tous les atomes élémentaires une parfaite unité d'action, et une énergie proportionnelle à leur nombre.

La rotation des atomes en favorise beaucoup le groupement; en effet, comme ils s'entre-choquent sans cesse, le parallélisme s'établit peu à peu entre les axes d'un

certain nombre d'atomes qui bientôt s'assemblent en une seule molécule. Enfin ce système heurtant d'une façon rhythmique, à droite et à gauche, en avant et en arrière, tous les atomes environnants, donne naissance à un véritable tourbillon; à son tour celui-ci diminue la densité de l'éther tout autour du système. Conséquemment, dans les groupes d'atomes formés, comme il vient d'être dit, les éléments ne sont liés par aucune force spéciale, ils restent accolés les uns aux autres d'abord, parce qu'ils ont une égale vitesse, et dans la même direction, ensuite parce que le milieu ambiant exerce sur eux une pression. Cette pression tient à la densité plus grande du milieu, à son inertie, et aussi à la réaction des chocs qu'exercent les autres centres de mouvements qui s'y trouvent.

Et comme on nous demandera pourquoi les tourbillons ne se dissipent pas sous l'influence de la force centrifuge qui s'y développe, nous répondons d'avance que cela tient partie à la cause qui les engendre, partie à la moindre pression qui règne dans leur intérieur. Semblable chose se passe dans les tourbillons des fluides ordinaires, et spécialement des gaz : ne voit-on pas des colonnes d'air tournoyantes se transporter dans l'atmosphère à une distance de plusieurs milles sans se rompre? En outre, il faut remarquer que les mouvements gyratoires des fluides pondérables ne sont pas semblables en tout à ce que nous avons nommé tourbillons éthérés. Ceux-ci naissent d'une rotation extérieure s'effectuant autour d'un axe déterminé, et au milieu d'une partie du fluide qui d'abord restant en repos relatif, enveloppe la masse animée de gyration, puis participe peu à peu au mouvement, alors celui-ci envahit un espace de plus en plus étendu, si bien qu'il finit par devenir tout à fait insensible. Les tourbillons des liquides et des gaz ne sont en définitive que des ondes d'un certain genre, mais les tourbillons éthérés ont leur origine dans la force de projection qui anime chacun des

atomes en particulier et se résolvent par suite en une sorte de pression continue. L'effet de dilatation autour de chaque centre est persistant et ne se propage pas, comme la vibration, dans un temps successif. Ajoutons encore que le milieu au sein duquel les tourbillons se développent n'est pas en repos, chacun des atomes environnants a une force et une impulsion à restituer; aussi ceux qui se meuvent suivant des orbites fermées et cèdent dans un sens une partie de leur vitesse aux atomes voisins, peuvent en regagner une certaine quantité d'un autre côté, et ainsi le mouvement se conserve indéfiniment.

Les tourbillons, ou plutôt les centres et sphères de dilatation, ont certainement une petitesse excessive; et il en faudrait plusieurs millions pour représenter la longueur d'une onde lumineuse. L'agitation des atomes ne peut donc se révéler à nos sens ni comme chaleur ni même comme lumière, car l'amplitude de leurs mouvements est infiniment moindre que celle des vibrations lumineuses. Chacun de ces tourbillons que nous pouvons nommer infinitésimaux, constituent une molécule des corps suspendus, en quelque sorte, dans le reste de l'éther, non agrégé et qui ne fait pas partie des tourbillons. Toutefois, l'éther, même à une distance indéfinie, se trouve dilaté; très-faiblement, à la vérité, en comparaison de celui existant au sein des groupes atomiques; et c'est cette raréfaction intérieure qui, agissant dans tous les sens, donne lieu à une dilatation rayonnante; elle est donc parfaitement comparable à celle que nous avons dit se développer autour d'un centre unique d'ébranlement, et c'est elle qui détermine l'attraction des masses limitées.

Quelque idée qu'on se fasse des centres de mouvement, qu'on les envisage comme des agrégats d'atomes éthérés ou comme des corpuscules de nature et de structure différentes, il n'en demeure pas moins vrai que leur très-rapide mouvement de rotation et de translation engendre

autour d'eux dans le milieu ambiant un tourbillon dont l'effet est de mettre en gyration une partie de l'éther, de le raréfier suivant une loi constante jusqu'à une distance infinie. Pour détruire un tourbillon, pour en accélérer la rotation ou la retarder, pour la traverser avec un corps étranger, pour en changer la direction, une force extérieure, une puissance mécanique, est toujours nécessaire. Alors il arrivera souvent que deux ou plusieurs tourbillons se réuniront en un seul, lequel, sous une sorte d'enveloppe gyratoire commune renfermera un ou plusieurs tourbillons plus rapprochés, mais dont les centres ne se toucheront pas.

Les forces attractives relèvent donc de deux principes parfaitement distincts : 1° elles dérivent de l'agitation pure et simple des atomes dans tous les sens; 2° de cette agitation combinée avec les rotations atomiques, et la fusion des atmosphères moléculaires. Puisque les forces moléculaires supposent, avons-nous dit dans le premier livre, une orientation des axes, elles doivent dépendre de l'action réciproque des mouvements rotatoires agissant à une fort petite distance ; au contraire, la gravité résulte très-vraisemblablement du simple choc des atomes et de la dilatation qui l'accompagne, quelle qu'en soit, du reste, la direction; c'est la seule modification du milieu qui se propage à grande distance.

Or, partout où se trouvent des centres de matière et de mouvement, l'éther présente un certain degré de dilatation. C'est pourquoi la gravité agit sur tous les corps, et constitue une propriété générale de la matière. Mais il ne peut en être ainsi de l'action gyratoire développée par les excursions des molécules centrales lorsqu'elles s'accomplissent dans certaines directions. Au voisinage de ces centres la dilatation sera très-variable, parce qu'elle subira l'influence des rotations et de l'oscillation rectiligne de la molécule, influence qui changera avec l'amplitude du

mouvement. Par contre, quand les distances seront considérables, les influences dont nous parlons deviendront insensibles. En conséquence, la loi élémentaire de la résultante sera complétement différente dans la couche contiguë à la molécule et à une plus grande distance; voilà pourquoi il ne faut pas confondre la gravité avec l'action moléculaire.

Nous trouvons là une seconde manière de concevoir le mécanisme du phénomène attractif; et de ce nouveau principe il nous sera possible de tirer, comme autant de conséquences, l'explication des nombreuses particularités que nous présentent les corps composés; un peu plus loin nous ferons voir comment l'agrégation des corps dépend des diverses modalités de cette cause déterminante.

Tous les mouvements qui s'accomplissent dans l'éther ne sont certainement pas perceptibles ni à la vue ni aux autres sens, et, pour eux comme pour les vibrations lumineuses ce serait folie d'en demander une preuve palpable; ces sortes de mouvements ne se peuvent démontrer que par le raisonnement. L'analogie est ici le seul guide auquel nous pouvons nous confier, et c'est elle qui déjà a permis aux physiciens de découvrir le véritable mode de propagation de la lumière, dès qu'ils eurent remarqué les nombreux points de contacts qui unissent l'acoustique à l'optique.

Nous ne nions pas que l'esprit éprouve quelques difficultés à admettre des mouvements aussi variés, une structure aussi complexe dans une molécule que nous sommes habitués à envisager comme un petit solide géométrique en repos. Et cependant le physicien en se représentant la molécule matérielle ainsi constituée ne risque pas une hypothèse plus improbable que celle reçue communément en astronomie touchant la constitution des nébuleuses. Dans le champ d'un télescope, une nébuleuse nous paraît un disque ou un anneau immobile. Mais la raison nous avertit bien vite que

c'est là une pure apparence due à la faiblesse de nos instruments et à l'immensité des distances; qu'en ce point de l'espace règne certainement une agitation excessivement grande sans quoi la forme que nous présente la nébuleuse ne saurait elle-même exister. Ce qui a lieu aux confins de l'univers se retrouve dans la molécule, cet autre extrême de la création. L'infiniment grand des mondes célestes est le domaine de l'astronome, l'infiniment petit des atomes appartient au naturaliste, mais un tel partage est tout artificiel; ici et là les lois demeurent les mêmes, la même mécanique gouverne les astres et les atomes. Le physicien qui s'illusionnerait jusqu'à prétendre déterminer les dimensions de la dernière molécule d'un corps simple serait aussi ridicule que cet ancien astronome qui avait évalué, disait-il, en milles anglais, la distance de Londres à la voûte étoilée.

La conservation du mouvement dans les systèmes tourbillonnaires n'offre aucune difficulté sérieuse après ce que nous venons de dire et les remarques déjà faites au sujet des vibrations calorifiques. Le mouvement ne se détruit jamais, il se transforme, change de direction, etc.; car, lorsqu'un corps tourne et se transporte à la fois, il est impossible que ses deux mouvements cessent simultanément. En effet, pour détruire la rotation, un choc doit être excentrique; par suite, il détermine le déplacement du centre de gravité; et, d'autre part, tout choc qui neutralise la translation change la rotation.

Dans tous les phénomènes physiques exposés jusqu'ici, et qui se passent journellement sous nos yeux, les mouvements semblent souvent s'annihiler, mais ce n'est qu'une apparence, et, en réalité, ils ne sont que transformés, soit en mouvements moléculaires appréciables, comme la chaleur, ou en d'autres travaux qui contre-balancent, surpassent même l'action de la gravité, et, produisent à l'intérieur des solides, les réactions réciproques des molé-

cules. Les mouvements des derniers atomes de la matière se font nécessairement dans un véritable vide absolu; et, par conséquent, les pertes de force vive sont impossibles; de résistance, il n'y en a pas davantage; par conséquent, ils persistent indéfiniment comme l'inertie de la matière. Les effets de frottement qu'ils paraissent éprouver se réduisent à une communication de mouvement au milieu ambiant, ce mouvement s'ajoute à celui que le milieu possède déjà; et ainsi l'énergie ne s'éteint jamais.

Les développements qui précèdent nous font comprendre que l'attraction est une conséquence du mouvement de la matière, et la théorie ici exposée est *une des manières* d'expliquer cet effet. La première impulsion une fois donnée, le mouvement ne s'anéantit jamais et persiste dans la masse sous une forme ou sous une autre.

Quelques analystes distingués ont donné de l'attraction une théorie dynamique autre que celle adoptée par nous. Par exemple, on a fait remarquer que, lorsqu'un liquide est animé d'un mouvement ondulatoire, les corps qui s'y tiennent suspendus peuvent subir un déplacement, ainsi les vagues de la mer rejettent sur le rivage les épaves flottantes. Et pour citer un autre fait, ne voit-on pas dans une masse formée par des substances de densité différente, les parties les plus lourdes gagner le milieu, lorsqu'on imprime à cette masse des secousses répétées. Enfin d'autres géomètres, considérant que l'analyse mathématique donnait dans les mouvements vibratoires une composante longitudinale sans action sur la lumière lui ont attribué l'attraction. Cette idée ne nous déplait pas, car elle nous semble, en définitive, rentrer à peu près dans la nôtre. Mais à toutes les théories qui déduisent l'attraction du mouvement ondulatoire, il est possible de faire l'objection suivante. Les ondes emploient du temps à se propager, et jusqu'ici on n'a pas constaté que les attractions se propageassent d'une manière successive.

D'après notre système, tout se réduirait à de simples

effets de pression : or, bien qu'au début la différence de pression ne s'établisse pas instantanément, cependant, au bout d'un certain temps, chaque centre de matière a autour de lui une sphère raréfiée qui, une fois développée, continue à exercer son action d'une manière permanente. Quand survient un déplacement du centre matériel, la sphère raréfiée se forme successivement avec une vitesse supérieure à celle du mouvement du centre lui-même. Elle ne s'établit pas tout d'un coup comme l'onde lumineuse, mais par une série de renforcements et de dilatations successives de la sphère préexistante; c'est pourquoi il est impossible de reconnaître l'influence de ces mouvements dans les effets des attractions [1].

Maintenant que nous savons d'une manière générale par quel mécanisme une attraction prend naissance, servons-nous de ces principes pour expliquer les groupes principaux de faits où les influences attractives entrent en jeu.

CHAPITRE IV

APPLICATION DU PRINCIPE PRÉCÉDENT A L'ATTRACTION MOLÉCULAIRE HOMOGÈNE ET A L'AFFINITÉ CHIMIQUE.

Les forces de la nature, desquelles il nous reste à parler, sont de trois espèces : 1° celles qui déterminent l'agrégation des corps homogènes; 2° celles qui unissent les substances hétérogènes, et 3° celles qui, s'étendant à des distances très-grandes, produisent les attractions planétaires et la gravité. Envisager ces forces comme dérivant de prin-

[1] L'auteur qui, en 1868, nous a objecté que Laplace avait démontré qu'il est impossible que la gravité se propage comme la lumière, n'avait pas fait attention à ce que nous disions ici ou tout au moins ne l'avait pas lu. Ce même auteur nous a attribué bien d'autres opinions qui ne sont que des imaginations de son cerveau.

cipes distincts a toujours semblé une superfétation inutile. C'est voir la complication là où, dans le plan de l'univers, règne une admirable simplicité. Ces diverses manifestations sont de même ordre, et les physiciens de tous les temps se sont constamment efforcés de rapporter les effets analogues, autant que faire se pouvait, à un même principe, comme nous le voyons par l'histoire de l'électricité; de nos jours, cette tendance s'est encore affirmée davantage[1].

Le premier effet que nous devons examiner est la cohésion des masses limitées, laquelle semble ne pouvoir exister que si l'on imagine les particules matérielles attachées les unes aux autres par des liens particuliers. Avec un peu de réflexion, on se convainc aisément du contraire. En effet, même dans ces corps, les molécules pondérables ne sont pas en contact réel, mais sont distantes les unes des autres; elles ne diffèrent des molécules d'une masse gazeuse que par le moindre écartement qui les sépare. Leur réunion ne suppose donc que les seules forces qui existent dans tous les autres états de la matière, mais à un *degré* d'intensité plus ou moins prononcé suivant qu'il s'agit de tel ou tel état physique. Tout corps solide soumis à l'action du feu se dilate, se ramollit, se liquéfie, et les parties étant ainsi séparées, la cohésion disparaît. Ainsi la cohésion est liée à un certain degré de rapprochement des parties; car, dans le solide le plus compacte, entre une particule et la suivante se trouve toujours un intervalle sans lequel le mouvement thermique serait impossible. La question à poser est donc celle-ci : le lien qui réunit les molécules solides consiste-t-il en forces abstraites ou bien

[1] Nous avons déjà exposé les idées de Mossotti. Il convient encore de rappeler ici quelques paroles de Lamé qui méritent d'être citées, *Théorie de l'élasticité*, p. 2. « La gravitation et l'élasticité doivent être considérées comme effets d'une même cause, qui rendent solidaires et dépendantes toutes les parties de l'univers. »

est-il le résultat de l'action d'un milieu? Évidemment il ne s'agit pas ici de forces abstraites; car, pour être excessivement petits, les intervalles moléculaires n'en existent pas moins, et nous serions forcés d'admettre que les forces agissent à distance, ce qui est absurde. Reste donc à examiner le seconde hypothèse.

De même qu'il n'est point nécessaire d'admettre une répulsion réelle, mais un mouvement expansif, ainsi les phénomènes attribués à l'attraction sont dus à cette disposition du milieu que nous avons signalée dans le chapitre précédent. Nous avons reconnu deux effets bien distincts qui contribuent à l'attraction : 1° la simple dilatation et la différence de densité du milieu provenant du double mouvement d'impulsion et de rotation des atomes; 2° l'enveloppe commune et la rotation de la totalité du tourbillon environnant. La première force paraît être inséparable de la molécule pondérable, elle est la conséquence nécessaire du mouvement dont elle est douée; sa résultante extérieure dépend de la distance; quant à son intensité, elle donne naissance à la force qui règle les mouvements des astres, et constitue la gravitation universelle. La seconde peut exister ou non à la même distance, elle est la cause des attractions moléculaires. Déjà dans le premier livre nous avons vu que, dans les deux classes de phénomènes, le principe initial n'était certainement pas identique en tout; nous allons actuellement éclaircir ce sujet.

Les solides ordinaires, avons-nous dit ailleurs, sont tels en vertu d'une cristallisation plus ou moins parfaite, et leurs propriétés optiques nous montrent un groupement régulier autour de *certaines directions axiales* dans les dernières parties qui les constituent. La molécule intégrante du cristal n'est autre chose qu'une réunion de ces centres d'action convenablement orientés. Mais comme les sphères ne peuvent remplir un espace donné lorsqu'elles

sont distribuées uniformément dans toutes les directions, ces juxtapositions d'atomes donnent, en général, naissance à des solides ayant des axes principaux de dimensions inégales. Les molécules fondamentales doivent donc avoir des moments d'inertie inégaux dans les diverses directions, et leurs rotations respectives ne sont pas les mêmes. D'où la diversité des formes cristallines primitives; desquelles, par les procédés de la cristallographie, se déduisent toutes les autres formes composées. Étant admis que chacun des centres élémentaires de ces figures agisse suivant une loi déterminée, par exemple, qu'elle exerce une action quelconque inversement proportionnelle à une puissance, la structure de l'édifice moléculaire se déduira de cette loi par des raisons de pure géométrie. De plus, la résultante des actions complexes qui se passent dans les solides élémentaires déterminera des attractions spéciales en rapport avec leur forme spéciale. Encore que les orientations primitives soient explicables sans recourir à l'intervention d'un milieu ; toutefois, elles deviennent par là plus faciles à comprendre.

En étudiant les changements d'état, nous avons vu que par la diminution graduelle de la vitesse propre aux molécules d'une substance gazeuse (ce qui revient à dire par la soustraction incessante du mouvement calorifique), ces molécules se rapprochent à tel point qu'une pénètre dans la sphère d'activité de l'autre, de façon à n'en pouvoir sortir. Alors elles se précipitent l'une contre l'autre avec un mouvement accéléré, et un choc violent a lieu, qui se traduit par un dégagement de chaleur ; si bien que, pendant le passage d'une partie du gaz à l'état liquide, la masse totale s'échauffe et ainsi empêche la liquéfaction de l'autre partie. Les sphères d'activité dont nous avons parlé ne sont autres que les tourbillons avec les sphères de raréfaction dont ils occupent le centre; et admettre que les sphères d'activité de deux mo-

lécules se fondent en une seule, équivaut à dire que deux tourbillons se réunissent sous une enveloppe commune. Durant le choc des molécules et la réunion de leurs atmosphères, la vitesse de translation se trouve transformée en une oscillation de la masse qui se manifeste comme chaleur, laquelle conserve une partie de la même masse à l'état élastique. Si la force vive continue à être absorbée de nouvelles quantités de gaz passeront successivement à l'état liquide jusqu'à ce que la masse entière soit liquéfiée.

A cet état, les mouvements de translation indéfinis sont éteints, les molécules restent emprisonnées dans la sphère des circonvoisines et oscillent suivant des courbes fermées, dont l'amplitude est fixée par la pression extérieure et par la force impulsive interne. Mais les axes sont libres dans tous les sens, et les rotations n'ont pas de direction commune définie. Que la soustraction de chaleur soit encore poussée plus loin, les molécules déjà formées continuent à se rapprocher, elles ressentent bientôt l'influence des rotations qui tendent à les mettre dans des directions parallèles et à les orienter. Alors, sans que le mouvement oscillatoire ait complétement cessé, le groupe formé conservera une forme déterminée et invariable. Au moment où ce second changement d'état s'effectue, une portion de l'éther change de vitesse et de direction, une certaine quantité de force vive se manifeste extérieurement, qui est celle dont étaient animés les axes des tourbillons durant le mouvement rotatoire, car ils cessent d'être axes instantanés ou tout au moins axes de mouvements analogues aux précessions pour devenir des axes permanents. Il est clair que, dans ce cas, la force vive, mise en liberté, est beaucoup moindre que dans celui examiné précédemment; de même pour le dégagement de chaleur. Déjà cette conclusion a été signalée dans le livre Ier, nous la reproduisons ici pour montrer que l'hypo-

thèse d'un milieu éthéré, loin de porter atteinte aux conclusions posées précédemment, les affirme, au contraire.

Les limites de distance en deçà et au delà desquelles une molécule est enfermée dans la sphère d'une autre, dépendent de l'intensité de la force impulsive et de la pression de l'éther ambiant. Ces deux éléments doivent être parfaitement définis dans chaque cas. A cause de cela, les points du passage d'un état à l'autre correspondent toujours à des températures fixes, la pression artificielle que supporte les substances demeurant constante, ils varient, au contraire, avec celle-ci.

Les groupes cristallins une fois formés par la simple orientation des axes doivent, en vertu des actions élémentaires de leurs atomes, réagir réciproquement entre eux à des distances excessivement petites, mais avec une énergie qui, d'après leur forme, n'est pas la même dans les diverses directions, et de la sorte ils peuvent tenir unis ensemble les éléments des groupes voisins qui ne sont pas parfaitement orientés, comme il arrive dans les agrégations confuses. Cela est facile à entendre, parce que, étant admis le principe d'une action élémentaire, il s'ensuit comme conséquence géométrique une forme spéciale du petit solide formé, et cette forme elle-même fait que certaines actions sont plus énergiques dans un sens que dans un autre. Ainsi s'expliquent les tendances des cristaux à se déposer sur les angles, les propriétés spéciales des corps filamenteux, etc., etc.

Lors d'un changement d'état physique, une portion de l'éther placé entre les molécules est souvent expulsé, ou au moins prend une autre disposition, parce que son mouvement dans l'intérieur du corps est nécessairement changé. De là les dégagements de chaleur et d'électricité qui les accompagnent, de là les courants électriques que fournissent les métaux au moment de la solidification, et cette

augmentation ou cette diminution de conductibilité que présentent les métaux, selon qu'ils se contractent ou se dilatent en prenant l'état solide [1].

De tout cela résulte que dans les liquides, et bien plus encore dans les solides, les molécules sont enfermées au sein d'une espèce d'atmosphère commune plus dense que le milieu occupant leur intérieur; autrement dit, en réalité, à l'intérieur des corps l'éther est raréfié [2]. Aux raisons qui en ont été précédemment données nous pouvons ajouter que la grande conductibilité des métaux (classe de corps dont les poids atomiques sont très-élevés), peut tenir à ce que, à l'intérieur de ces substances, l'éther est proportionnellement moins condensé que dans les autres, et que par suite, lorsqu'ils sont envahis par le torrent électrique, ce dernier y trouve une circulation plus facile. Mais nous présentons cette idée sous toutes réserves.

Depuis longtemps déjà, Fusinieri et Graham ont noté que, plus par des moyens mécaniques ou autres, on porte la matière à un grand état de division, plus on augmente son pouvoir diffusif; si bien qu'à travers les parois poreuses, la pénétration réciproque des gaz acquiert une intensité extraordinaire. A cette même force diffusive se réduisent les phénomènes d'expansion que présentent les lames liquides très-minces. De tels faits prouvent qu'on ne peut absolument pas négliger l'influence de la masse même dans les actions moléculaires. A mesure que les molécules pesantes sont davantage soustraites à l'influence des molécules voisines qui les enveloppent, à mesure s'ac-

[1] De la Rive a constaté qu'au moment de la solidification, la conductibilité se trouvait doublée dans tous les métaux, excepté dans ceux qui, à ce moment, éprouvent une dilatation, tels sont le bismuth et l'antimoine. Il est aussi remarquable que plusieurs métaux cristallins présentent entre la solidification et la fusion un état pâteux (ex. l'étain), mais durant fort peu de temps.

[2] Voy. p. 237 et suiv.

croît leur facilité à céder au mouvement diffusif. Notre théorie rend aisément compte de ce résultat. Plus est grande la masse pesante intérieure, plus est grande la dilatation relative du milieu renfermé en elle; et par suite la pression extérieure; précisément, parce que la dilatation augmente quand les centres d'expansion sont très-rapprochés. Sans doute, les rayons de ces sphères, même dans la partie où elles agissent avec l'intensité maximum, sont d'une petitesse extrême, mais elles ne sont nullement négligeables les unes par rapport aux autres; aussi, quand elles sont réunies, leur action résultante est d'autant plus considérable qu'elles sont plus nombreuses. Mais à cause de cette petitesse, l'influence des masses dans les phénomènes moléculaires devient promptement insaisissable, et à de grandes distances l'effet qui constitue la gravité demeure seul sensible. En définitive, les attractions sont produites indirectement par la force expansive, celle-ci développant un état de pression ambiante, qui est la cause du mouvement des corps les uns vers les autres.

La nature des tourbillons éthérés est ici mise en pleine lumière, et on reconnaît en quoi notre comparaison était insuffisante lorsque nous les assimilions à de petits moulinets; puisqu'ils sont en outre de véritables centres de raréfaction. Il importe aussi de distinguer les tourbillons moléculaires de ceux propres aux aimants. L'action de ces derniers s'étend beaucoup plus loin, au moins pour ce qui est de produire la vraie polarité magnétique, car ils sont souvent détruits ou insensibles quand les autres conservent toute leur énergie. Néanmoins on tomberait dans une exagération regrettable en repoussant toute relation entre les deux genres de tourbillons; en effet, si la polarité magnétique disparaît quand une substance perd l'état solide, les dernières molécules des corps conservent toujours une certaine facilité à s'orienter qui les rend aptes

à subir l'influence de l'aimant. Le magnétisme favorise manifestement l'adhésion moléculaire, et peut-être il serait possible d'expliquer par là pourquoi une lime déjà usée attaque le fer alors qu'elle ne mord plus sur le laiton. Il y a tout lieu de croire que le magnétisme augmente la cohésion, car les diapasons, après avoir été aimantés, vibrent comme si on les avait raccourcis. On sait, en outre, quelles différences les divers corps présentent, relativement à la cohésion; le plus tenace de tous, est précisément le fer, dans lequel l'orientation des tourbillons est tellement prononcée qu'elle donne à ce métal une structure sensiblement *fibreuse*.

Aux différents degrés d'intensité de ces forces est due toute la classe de propriétés que, dans les corps, on nomme flexibilité, viscosité, ductilité et élasticité.

L'élasticité commune résulte de ce que les groupes des molécules peuvent se déplacer d'une certaine quantité sans sortir de leurs sphères réciproques; et la cause perturbatrice ayant cessé d'agir, elles reviennent plus ou moins exactement à leur position première sous l'influence des forces qui les y sollicitent [1]. Cette élasticité est donc un effet secondaire de forces primitives et ne doit pas être confondue avec celle dite élasticité des atomes, qui est due uniquement aux propriétés mécaniques des mouvements rotatoires élémentaires. Pour ne pas avoir fait cette distinction, quelques personnes ont, bien à tort, déclaré qu'il y avait absurdité à regarder l'élasticité comme résultant des rotations moléculaires. Si l'on entend donner une telle origine à l'élasticité qui entre en jeu dans la flexion des ressorts et le choc des billes d'ivoire, la critique est fondée. Ce n'est pas, en effet, la rotation visible des particules palpables constituant les corps élastiques qui directement détermine le redressement d'une

[1] Voy. la définition de l'élasticité donnée ci-dessus, p. 250.

lame flexible ou le rebondissement des billes d'ivoire ; leur action n'est que médiate; car c'est la rotation atomique qui donne naissance aux atmosphères des molécules, et l'effet d'élasticité est toujours le résultat d'une modification survenue dans ces atmosphères.

Nous ajouterons que les molécules des gaz, bien qu'elles ne soient pas de vrais atomes élémentaires, tirent probablement leur élasticité du même principe. Ici nous parlerons spécialement des solides.

L'élasticité de certains corps a une limite qui ne peut être dépassée sans qu'il en résulte une rupture du corps. Les substances vitreuses, cristallisées ou non, etc., sont dans ce cas. Avec d'autres substances, au contraire, la limite d'élasticité une fois dépassée, les molécules ne reprennent plus leur position première, et conservent plus ou moins le nouvel arrangement qui leur a été communiqué ; parmi ces substances on compte la plupart des métaux dans lesquels cette propriété constitue la *plasticité* et la *ductilité*. Ces différences sont manifestement liées au mouvement de l'éther à l'intérieur des corps.

Les substances de la première classe sont isolantes, celles de la seconde conductrices [1]. Cette division présente sans doute des exceptions ; mais celles-ci, pour la classe des isolants, appartiennent à des combinaisons assez compliquées d'origine organique, et pour la seconde à quelques minéraux d'aspect métallique, certains cristaux, par exemple, à l'intérieur desquels l'éther n'a pas partout une égale densité, comme nous le prouvent leurs propriétés optiques. Toutefois, la règle indiquée s'applique à la majorité des substances, et spécialement aux corps de composition plus simple.

Cette relation n'est pas difficile à comprendre d'après

[1] Les substances isolantes (le verre par exemple), en laissant passer la décharge électrique, se dégagrégent et leurs molécules sont lancées hors des limites de l'élasticité.

notre manière d'envisager l'influence de l'éther sur la cohésion. Dans les corps de la première espèce, son mouvement est gêné; aussi, quand la position relative d'une molécule est changée, quand elle est presque entraînée hors de la sphère de la molécule voisine, l'éther ne peut affluer pour combler le vide formé, rétablir l'équilibre de pression et empêcher la séparation des parties. Dans les corps conducteurs, au contraire, un tel mouvement se fait aussitôt. Un nouveau régime d'atmosphères intérieures s'établit et remplace celui qui vient d'être détruit, de sorte que les molécules peuvent garder plus ou moins les nouvelles positions que leur ont données les forces extérieures. Les choses se passent ici à peu près comme dans une masse de matière pulvérulente. Par une forte pression, elle s'agglomère, forme un solide compacte, mais qui se sépare et se désagrége facilement; si la masse est mêlée à un liquide parfaitement fluide, de façon à former une pâte, la masse prend une consistance qui en rend la séparation difficile, et lui permet de changer de forme sans se rompre; et cela parce que le liquide, en vertu de sa mobilité passant d'une partie à l'autre par effet capillaire, établit une liaison entre les parties aussitôt après qu'elles ont éprouvé le moindre déplacement.

En rapprochant les points de contraste entre les corps métalliques et les non métalliques signalés dans les diverses parties de cet ouvrage, on trouvera que la mobilité de l'éther, à l'intérieur des premiers, explique de la manière la plus naturelle une multitude de leurs propriétés, dont autrement il serait difficile de trouver la raison.

Cette hypothèse a encore un avantage qui mérite d'être prise en sérieuse considération ; elle jette un lien entre les propriétés optiques et électriques des corps et leurs propriétés moléculaires; ainsi la ductilité, la malléabilité des

métaux, la facilité avec laquelle quelques-uns d'entre eux, l'or, par exemple, se laissent étendre en feuilles excessivement minces, dépendent de la mobilité de l'éther dans leur masse, et voilà pourquoi ceux doués de la plus parfaite plasticité et ductilité sont en même temps les meilleurs conducteurs de l'électricité, tels sont les métaux nobles.

Toutes ces propriétés appartiennent aux groupes atomiques de second ordre, les atomes primaires n'en sont pas doués. Ils ne sont ni ductiles, ni flexibles, ni élastiques; ils obéissent uniquement aux lois des corps durs, tant pour le mouvement de translation que pour celui de rotation; mais lorsqu'ils sont agrégés en vertu de la force de projection qui les anime, et de la pression extérieure qui s'exerce sur les groupes, toutes les propriétés générales des corps apparaissent en même temps.

Comme le physicien praticien se propose seulement d'*ordonner* les faits et de les ramener à un principe commun (ce que l'on appelle ordinairement les *expliquer*), il se borne à considérer comme primitives ces forces qui réellement sont secondaires. Par exemple, envisageant l'élasticité comme une force primitive susceptible de ramener les molécules à leur position aussitôt qu'elles en sont écartées, il applique son principe aux divers cas particuliers et aux diverses manières, dont l'équilibre d'un groupe moléculaire peut être troublé, suivant que la rupture d'équilibre est linéaire, superficielle ou cubique, suivant que la cause perturbatrice agit par traction, torsion, compression ou autrement. Il se déclare satisfait quand il a fait voir que tout dépend de ce fait primitif que les molécules sont ramenées à leur position naturelle d'après certaines lois qu'il s'efforce de trouver. De même le but que s'est proposé l'astronome est la réduction des phénomènes célestes à la mécanique générale par la formule de la gravitation. Mais cela ne suffit pas pour nous convaincre du caractère primordial de ces forces, elles peuvent n'être que secon-

daires et se plier parfaitement à toutes les exigences de l'observation. Ce sont les recherches du philosophe qui doivent éclairer la question d'origine.

En méditant sur la théorie du mécanisme des attractions donnée ci-dessus, on reconnaît avec quelle justesse Lamé a pu comparer la force d'élasticité à celle de la gravitation[1], et combien il est rationnel de rapporter ces deux forces à une même cause.

Toutes les fois que survient une rupture de l'équilibre des pressions moléculaires dans une certaine direction, aussitôt il s'exerce une attraction dans cette même direction. Tel est précisément le cas des surfaces libres, sur lesquelles s'observent les effets de *capillarité* et de *diffusion* ; car, suivant la remarque très-exacte de Fusinieri, les premiers phénomènes ne sont qu'un cas particulier des seconds. Les minces couches liquides, qui se répandent avec une extrême facilité sur les surfaces fluides, s'étalent également bien sur les solides; quand elles sont dans certaines conditions dites d'affinité, et la forme que prend la surface du liquide en mouillant un solide, et en se répandant à sa surface, joue un grand rôle dans le mécanisme de l'ascension de ce liquide à l'intérieur des tubes capillaires. La condition de capillarité doit dépendre de la structure relative des atmosphères moléculaires, qui, mises en contact, se fondent plus ou moins facilement en une seule. Cette force agit encore dans d'autres cas dans la dissolution, par exemple, en déterminant une diffusion. Lorsqu'on opère sur une substance d'une désagrégation facile, par exemple, sur un sel, le liquide le dissout, et il se sature jusqu'à ce que la force diffusive égale en intensité la force d'orientation qui, retenant unies ensemble les molécules du cristal, pourrait être nommé en quelque sorte une force polaire.

[1] Voy. Lamé, passage cité au commencement de ce chapitre.

Les phénomènes capillaires nous amènent, par une transition des plus naturelles, à l'action purement moléculaire à l'affinité chimique.

Ces deux forces ne sont pas réellement d'origine différente; et la diversité dans leur manière d'agir est la conséquence de celle qui existe entre les masses mises en contact. Dans les attractions homogènes, les masses centrales et les atmosphères environnantes étant toutes identiques, il faut que toutes ensemble elles perdent une certaine quantité de force vive, pour qu'elles se pénètrent réciproquement et qu'il se forme une seule atmosphère enveloppant plusieurs centres. En outre, l'observation prouve qu'au moment où les atmosphères sont arrivées au degré de rapprochement voulu pour leur réunion, elles ne se pénètrent pas immédiatement et restent souvent en suspension, parce qu'il n'y a pas de cause qui détermine la réunion à se faire plutôt entre celles-ci qu'entre celles-là ; semblable chose arrive toujours quand le rapprochement a lieu peu à peu et tranquillement. Ainsi de l'eau tenue en suspension dans une huile se conserve fluide à plusieurs degrés au-dessous de zéro, jusqu'à ce qu'une agitation extérieure vienne rompre l'équilibre instable.

L'action chimique, au contraire, s'exerçant entre masses hétérogènes, l'inégalité des atmosphères doit favoriser considérablement leur rupture et leur pénétration réciproque. En effet, puisque deux corps animés de vitesse inégale quand ils s'entre-choquent tendent toujours à prendre une vitesse commune, rien n'est plus facile que la réunion en un seul groupe des molécules hétérogènes et de leurs atmosphères.

L'inégalité des atmosphères étant admise, toutes les modalités de l'affinité chimique se trouvent expliquées du même coup. On comprend pourquoi les affinités sont relatives, comment deux corps occupant la même extrémité de l'échelle des affinités, le sodium et le potassium, par

exemple, ne réagissent nullement l'un sur l'autre, et, au contraire, se combinent énergiquement avec ceux placés à l'autre bout de l'échelle. Ampère attribuait le dégagement de chaleur qui accompagne une combinaison à la recombinaison des deux électricités, et disait que l'affinité chimique est proportionnelle aux doses relatives des fluides positif et négatif.

Les faits s'interprètent beaucoup mieux dans l'hypothèse d'un éther simple, en supposant 1° que chaque molécule est constituée à son centre d'une sphère dont le volume et la vitesse change d'une molécule à l'autre ; 2° que la facilité avec laquelle la fusion des atmosphères, c'est-à-dire la rapidité avec laquelle une molécule se précipite sur une autre, est d'autant plus grande que les atmosphères sont plus différentes, et par leur étendue et par leur vitesse.

Cette théorie rend parfaitement compte de l'influence de la chaleur sur les combinaisons chimiques et sur l'affinité. En effet, toute nouvelle quantité de force vive ajoutée à une masse pesante durant l'élévation de température fait varier les vitesses de translation et de rotation des molécules d'une manière très-inégale à cause de leur masse différente; il peut donc se faire que deux molécules, dont les atmosphères et les tourbillons sont à une certaine température notablement différentes, par leur étendue et par leur densité, arrivent à avoir ces deux éléments presque égaux à une autre température, et ainsi l'affinité, ou, en d'autres termes, la facilité de pénétration des molécules diminue. Par contre, deux molécules dont les atmosphères sont sensiblement égales, lorsque la température change, peuvent devenir dissemblables, alors l'affinité, nulle à la température ordinaire, acquiert une intensité très-marquée quand le thermomètre atteint un degré plus élevé, si bien que tel corps peut, comme l'on dit, passer d'un état d'affinité positif à un état négatif, l'ordre des affinités étant complétement renversé.

Peut-être pourrait-on expliquer par là comment le même corps qui, à une température donnée, décompose un corps et en sépare un des éléments, est à son tour chassé de ses combinaisons par ce même élément quand la température s'élève davantage, et quelquefois au même degré de chaleur. Ainsi le fer chauffé au rouge décompose l'eau et met l'hydrogène en liberté, de son côté, l'hydrogène, à la chaleur rouge ou à peu près, réduit l'oxyde de fer à l'état métallique. Il est prouvé que dans ces actions un même corps agit tout différemment comme agent réducteur suivant qu'il est libre ou combiné, car la cohésion entre alors en jeu.

C'est aussi la cohésion qui, lors du mélange de deux sels neutres, détermine leur double décomposition en précipitant un nouveau composé d'une solubilité autre que celle des deux composants.

Cette théorie permet encore d'expliquer pourquoi dans une combinaison la chaleur dégagée est d'autant plus considérable que les termes sont plus distants sur l'échelle des affinités, et pourquoi, relativement aux actions thermiques électriques et chimiques, la sériation des corps reste la même. Il suffit de remarquer que la force vive rendue libre [1], et la quantité d'éther dont l'équilibre est troublé sont d'autant plus grandes que les atmosphères diffèrent davantage les unes des autres. Mais, à parler rigoureusement, il n'est pas possible dans tous les cas de mesurer l'affinité chimique par le courant produit, attendu que le plus souvent il est constitué seulement par une partie de l'éther mis en mouvement et on ne devra recourir à ce procédé de mesure que dans les cas où l'on a la certitude que toute autre déperdition d'éther n'existe pas [2].

[1] Voy. liv. I, ch. x.
[2] Voy. liv. I, ch. xiv.

Les combinaisons chimiques se trouvent donc de la sorte réduites à des actions mécaniques, conclusion à laquelle nous sommes déjà arrivé en terminant l'étude des décompositions produites par la chaleur et la lumière. Il convient cependant d'ajouter quelques mots touchant l'influence des actions mécaniques sur les phénomènes chimiques. Pour traiter cette question, nous puiserons des données utiles dans les faits observés récemment par Clifton, en examinant les effets de la pression sur la solubilité des sels, et les autres actions chimiques.

On savait depuis longtemps que sous de fortes pressions les actions chimiques éprouvent des changements notables. Par exemple, quand la pression dépasse certaines limites, le zinc cesse de se dissoudre dans l'acide sulfurique, l'acide carbonique, de se dégager, etc. Les nouvelles recherches poursuivies dans cette voie fournissent de solides arguments à la théorie qui regarde toute réaction chimique comme un travail mécanique. Examinons d'abord la question d'une manière générale. On peut dire que la pression, en rapprochant les molécules, agit à la façon d'un abaissement de température, et comme telle doit modifier l'affinité, par une action toute mécanique. Quand les effets de pression et de chaleur interviennent simultanément, par exemple dans les cas de fusion, de solidification des corps comprimés, deux cas sont à distinguer suivant qu'il se fait une contraction ou une dilatation : la température du *point de passage* s'élève quand les substances se contractent et s'abaisse quand elles se dilatent. Dans le premier cas la pression agit dans le sens d'une soustraction de chaleur pour rapprocher les molécules et par suite, la solidification s'obtient à une température plus basse. Dans le second cas, précisément parce que la pression rapproche les molécules, il faut pousser plus loin la soustraction de calorique afin de surmonter à la fois la pression et les autres forces; aussi l'eau suffisamment

comprimée ne se gèle que si elle est refroidie à plusieurs degrés au-dessous de zéro.

Le même effet se reproduit dans les combinaisons chimiques, et, selon que le volume du composé est plus grand ou plus petit que la somme des volumes de ses composants, la réaction est ralentie ou accélérée par la pression. Voici du reste la conclusion du savant auteur que nous prenons pour guide : « Très-probablement les recherches ultérieures démontreront que la pression affaiblit ou renforce l'affinité chimique, selon qu'elle agit contre ou en faveur du changement de volume, comme si l'action chimique était directement convertie en puissance mécanique, et la force mécanique en action chimique suivant des équivalents définis, et suivant des lois générales, sans même que nécessairement la relation s'établisse par l'intermédiaire de la chaleur ou de l'électricité. »

La connexion, ou, comme l'on dit, la *corrélation* de l'action chimique avec la chaleur et l'électricité est manifeste dans les phénomènes de la pile, précédemment analysés par nous, et le mot bien connu de Faraday que le *courant est une action chimique en mouvement*, ne saurait avoir de sens si l'on n'envisageait pas l'action chimique elle-même comme un effet de mouvement mécanique. Bien que l'évidence de cette proposition fût manifeste, cependant il était bon de déterminer directement l'influence des forces mécaniques sur les actions moléculaires et chimiques. Clifton a mesuré dans un grand nombre de cas les forces mécaniques que sont capables de développer certaines de ces actions. Ainsi l'eau, au moment où elle se congèle, peut soulever 106 fois son propre poids à une hauteur de 1 mètre ; le chlorure de sodium et le sel ammoniac, en se dissolvant, exercent un travail qui, pour le premier, est égal à 157 fois son poids élevé à 1 mètre de haut, et pour l'autre 171 fois. Un minéral appelé witherite en se formant

développe un effort capable d'élever à 1 mètre un poids égal à 35 fois le sien[1].

Tout porte à croire qu'en comparant avec soin les dilatations, les capacités calorifiques et les tensions des substances à l'état de vapeur, on arrivera à rendre compte de tous ces phénomènes. Mais ici nous devons nous borner à montrer comment les principes établis suffisent pour faire comprendre le mécanisme des faits fondamentaux de la science.

Déjà ailleurs nous avons fait remarquer que l'action chimique suppose toujours les molécules à l'état d'atténuation, de dissociation comme l'on dit. Nous avons ajouté que les rayons lumineux émis par les corps sont de toutes les longueurs possibles, tant que ces substances sont maintenues par les liens moléculaires, de sorte que ces rayons sont comparables à ce que l'on nomme, en acoustique, des *bruits*. Au contraire, lorsque les substances sont à l'état de vapeur, elles donnent naissance à des ondes d'une longueur bien définie semblables à celles des *sons musicaux;* cela ne montre-t-il pas que les molécules vibrent en parfaite liberté sous l'influence de forces proportionnées à leur masse. La nécessité d'un état de grande division et d'une liberté aussi complète que possible dans les molécules qui prennent part à une réaction est facile à comprendre; car une sphère de molécules peut ainsi agir sur une autre, la pénétrer, et se réunir à elle pour en former une seule qui est la sphère du composé. Les personnes qui, avec quelques dynamistes, ne veulent admettre que le mouvement sans l'éther, ne parviendront jamais à expliquer ces réunions moléculaires, à moins d'imaginer des forces abstraites auxquelles il faudra toujours supposer une nature des plus capricieuses.

La conséquence nécessaire des principes établis est

[1] Clifton, *Proceedings Roy. Soc.* London, avril 1863, p. 549.

que la force chimique ne s'exerce jamais à des distances sensibles, et que, pour se manifester, ce que nous nommons le contact est toujours nécessaire. On n'a jusqu'ici découvert aucun fait d'action chimique réalisable autrement qu'au contact, et si une grande masse favorise les combinaisons, c'est indirectement, parce qu'elle rend les points de contact plus nombreux.

Les mêmes principes expliquent l'égalité des équivalents calorifiques, chimiques et électriques. Comme nous l'avons déjà vu, la quantité de chaleur produite par les actions chimiques est définie pour chaque combinaison, et reste toujours la même, que celle-ci se fasse rapidement ou lentement. Nous avons en outre reconnu que cette quantité demeure constante pour l'électricité toutes les fois que le mouvement éthéré produit par la combinaison peut être recueilli dans un fil conducteur, puis mesuré. Si bien que le développement de l'électricité est subordonné à celui de l'action chimique.

On comprend très-bien la raison d'une telle concordance, puisque la force vive de l'éther représente alors la force mise en mouvement par la combinaison : à peu près comme la quantité d'air injectée par un ventilateur sert de mesure à la puissance de cet appareil. Mais le plus souvent, cette mesure n'est pas complète et elle ne peut l'être, car il faut défalquer la force vive employée aux dilatations sous forme d'élévation de température dans certaines parties du circuit, pertes difficiles à évaluer. On doit, en outre, tenir compte de ce que les produits de la combinaison chimique ordinaire et de l'action de la pile ne sont pas doués d'une égale force de cohésion; enfin il y a une déperdition d'électricité par tous les corps très-difficile à éviter.

Clifton, ayant montré que l'action chimique se résout en puissance mécanique dans les divers solides, donne très-probablement la raison des différences que l'on ob-

serve dans plusieurs cas sous le rapport de l'équivalent calorifique entre l'action chimique ordinaire et l'action voltaïque ; il suffit, en effet, d'une légère différence dans l'agrégation moléculaire des substances qui prennent naissance dans les deux cas, pour que leur formation absorbe une quantité variable de force et la rende latente, comme le dit Clifton[1]. Aussi, même dans les expériences conduites avec un soin extrême, lorsque la force vive est mesurée sous forme d'électricité, le résultat est inférieur à celui que l'on obtient en mesurant cette même force vive sous forme d'agitation thermique.

En résumé, la quantité plus ou moins grande de la force vive propre à chaque molécule qui devient libre durant les diverses combinaisons, est la source des effets mécaniques produits par les actions chimiques. Cette force vive se manifeste le plus souvent comme dilatation de la matière pondérable dans les opérations ordinaires ; mais dans les combinaisons voltaïques, elle se transmet par le moyen d'un mouvement éthéré, développé lui-même par la dilatation et la rupture de l'équilibre de l'éther.

La diversité du volume et de la densité des atmosphères, l'étendue variable de leurs rotations, ne sont pas les seules causes déterminantes des combinaisons ; l'oscillation rhythmique des molécules primitives y contribue puissamment. Les oscillations sont-elles en dissonance complète? leur union sera plus difficile *cæteris paribus;* se trouvent-elles, au contraire, à l'unisson, ou présentent-elles seulement un rapport de durée tel que la coïncidence s'établisse entre elles à intervalles égaux? elles pourront très-bien osciller comme un seul corps et agir comme une masse unique, à cause de la différence entre les masses des molécules. Les périodes de vibration sont modifiées

[1] Il convient de se rappeler ici ce qui a été dit de la puissance mécanique de la chaleur eu égard à la cohésion des corps, liv. I, ch. XII.

quand augmente la force vive calorifique; par suite, la tendance de deux molécules à s'unir ne reste pas la même aux divers degrés de l'échelle thermométrique, cela tient à ce que deux substances dont les oscillations sont synchrones à une certaine température seront probablement discordantes à une autre.

On voit quel vaste horizon la théorie mécanique de la chaleur, combinée avec celle de l'éther, ouvre aux spéculations de ceux qui cherchent une explication rationnelle des faits de la chimie, tous si bizarres en apparence. Probablement les études spectrales fourniront un jour la preuve directe de ces inductions théoriques en signalant des relations entre la longueur des ondes élémentaires lumineuses produites par la combustion d'une substance et son rang dans l'échelle des affinités. M. Hinrichs a déjà avancé de remarquables inductions sous ce rapport. Il trouve que les lignes spectrales sont plus serrées pour le corps ayant le plus grand poids atomique, et que la distance de ces lignes est approximativement inversement proportionnelle à la dimension de l'atome calculée d'après des principes fort ingénieux [1].

Donc diversité de volume dans les atmosphères, coïncidence de rhythme dans les vibrations, telles sont les deux causes principales qui provoquent la réunion des corps hétérogènes; autrement dit, les deux causes de l'affinité chimique. De plus, le caractère essentiel de ces actions, le principe qui les gouverne toutes, c'est la permanence de la masse, de même que celle de l'énergie ou force vive. L'intensité de l'affinité doit diminuer, on le sait, toutes autres conditions égales d'ailleurs, à mesure que le nombre des molécules constituant une molécule composée devient plus grand. Cela s'explique maintenant, car ces molécules complexes sont comparables à des tourbillons qui,

[1] Silliman, *American Journal*. July 1866.

formés de plusieurs autres, se séparent facilement en augmentant l'énergie de ceux qui les composent et dans lesquels la pression ainsi que la vitesse de rotation diminuent quand le diamètre augmente. Voilà pourquoi les substances dont la molécule est très-compliquée, en particulier celles d'origine organique, se décomposent rapidement sous l'influence de la châleur. Ainsi une des conditions premières de la vie est l'élaboration incessante de produits très-complexes, laquelle réclame une certaine température. Les êtres organisés ne peuvent supporter les variations calorifiques que dans des limites assez rapprochées hors desquelles ils cessent d'exister.

Aussi la vie végétale se distribue-t-elle en zones climatériques caractérisées chacune par une certaine moyenne du thermomètre, et si les divisions de la géographie animale sont moins nettement tranchées, c'est parce que l'animal a dans son organisme une source de chaleur qui rend en grande partie sa température indépendante de celle du milieu ambiant. Chacun sait, en effet, que la température d'un animal demeure rigoureusement constante. Les moindres variations sont rendues impossibles grâce à mille précautions toutes providentielles ; le corps est revêtu d'enveloppes isolantes qui s'opposent à la déperdition de la chaleur et, d'autre part, lorsqu'un exercice musculaire énergique développe de la chaleur en excès, la sueur qui se répand aussitôt à la surface des membres, détermine en se formant et en s'évaporant une réfrigération considérable.

Telle est la théorie à l'aide de laquelle on peut coordonner les faits principaux de la chimie. Nous ne nous arrêtons pas à examiner en particulier toutes les combinaisons, un tel travail nous entraînerait dans des longueurs sans nombre, et, vu l'état actuel de la science, il nous faudrait à chaque instant entasser hypothèse sur hypothèse; limitons-nous à écarter certaines difficultés que les faits

les plus ordinaires pourraient fournir contre la thèse développée ci-dessus.

On connaît des corps qui, mis en présence, même sous de fortes pressions ne se combinent pas, et quand on leur imprime un choc, ou quand on les excite soit par une vibration lumineuse, soit par une étincelle électrique, imdiatement une réaction se déclare et marche avec une rapidité prodigieuse.

C'est qu'en effet pour surmonter l'inertie propre à chacune des atmosphères animées de rotation, c'est-à-dire pour changer la direction de leur mouvement individuel, il faut un effort énergique, une pression énorme; mais une pression générale qui s'exerce sur la masse, même très-forte, par cela seul que, répartie sur la masse entière, elle agit sur toutes les atmosphères à la fois, n'arrive à vaincre la résistance d'aucune. Par contre, une étincelle électrique ou toute autre des causes indiquées, agissant avec une grande violence sur un point très-restreint du corps, y détermine une rupture qui facilite la combinaison, puis l'ébranlement de proche en proche gagne toute la masse. Ainsi nous voyons un édifice qui d'abord résistait à des pressions considérables, s'écrouler tout à coup lorsqu'on vient à enlever une seule pierre; de même encore un vase de verre supporte sans se briser de fortes pressions, tandis qu'un léger coup frappé sur un seul point le fait voler en éclats.

Au moment où s'accomplissent ces brusques changements d'équilibre, surtout ceux qui succèdent à un état de tension, il se dégage presque toujours une énorme quantité de chaleur; et l'on ne doit pas s'en étonner, car un nouveau groupement moléculaire ne peut avoir lieu sans une extrême agitation intérieure; d'où une vibration des atomes qui constitue l'élévation de température. Il importe toutefois de bien se rappeler que lorsque la chaleur donne naissance aux effets les plus violents, la quantité de tra-

vail mise en jeu est aussi grande que si la réaction s'était faite lentement, la différence porte sur le temps du travail et non sur sa quantité absolue.

Les actions mécaniques extérieures peuvent encore décomposer les systèmes dans lesquels, à cause du grand diamètre des tourbillons, la vitesse de rotation se trouve notablement diminuée, à tel point que la différence entre cette vitesse et celle du milieu environnant étant assez petite, le moindre effort suffit pour pénétrer l'enveloppe. Un choc, une vibration, une étincelle, détruiront facilement de semblables composés, car une fois le tourbillon rompu, les molécules élémentaires reprennent leur état normal, souvent même avec une grande rapidité. De cette manière s'expliquent un grand nombre d'explosions, en particulier celles des fulminates d'argent et de mercure, deux combinaisons extrêmement instables et dont les molécules sont, pour ainsi dire, dans un état forcé.

Il serait absurde d'attribuer le violent ébranlement dont s'accompagnent ces décompositions à la très-faible action mécanique qui en est seulement la cause occasionnelle ; il résulte de la mise en activité de la puissance emmagasinée dans les molécules elles-mêmes, véritables dépôts de force vive, et quand cette force vive vient à se manifester, ses effets sont bien autrement intenses que ceux qu'il nous est donné de produire par les procédés mécaniques ordinaires[1].

Que l'on se reporte à ce que nous avons dit de la puissance mécanique équivalente à l'action calorifique nécessaire pour dissocier l'eau, et l'on comprendra qu'il n'est pas absurde de supposer emmagasinée dans l'intérieur des corps une immense quantité de travail ou de force vive, la-

[1] De même la force vive dont est animé un corps dans sa chute ne lui a pas été communiquée par le faible effort nécessaire pour couper la corde à laquelle il était attaché, mais par la gravité qui précipite le corps vers la terre.

quelle se convertit en chaleur au moment où ils font explosion. Un peu plus haut, à propos des effets de la chaleur solaire, nous avons dit quel sens on doit attacher à cette manière de parler; nous reconnaissons maintenant la nécécessité d'admettre qu'autour des atomes appartenant aux divers corps les atmosphères doivent avoir une densité différente suivant qu'ils sont isolés ou combinés. La raréfaction des atmosphères exige que l'intensité vibratoire de la molécule et sa force vive augmentent d'une façon très-sensible. Quelle force produit cet accroissement de vitesse? Les faits dont nous allons parler vont nous l'apprendre. La force d'une masse d'eau qui gèle dans une seconde de temps est capable, avons-nous dit, d'élever à une hauteur de 1 mètre 106 fois son propre poids, ou bien encore d'élever son propre poids à 106 mètres de hauteur en une seconde. Par suite, elle exerce un travail sensiblement égal à onze fois celui de toute la masse terrestre à sa surface. Dans 1 kilogramme de charbon qui passe à l'état de vapeur, le travail intérieur serait de 3,910,400 kilogrammètres. (Dupré.)

L'action réciproque des atmosphères peut encore donner la raison de l'effet produit par la présence d'un troisième corps, lequel souvent sert de trait d'union à la combinaison de deux autres, sans que lui-même reste combiné, action comparable à celle du métal négatif dans la pile. Peut-être alors deux atmosphères qui ne s'uniraient pas directement parce que leurs vibrations sont trop discordantes, peuvent arriver à la combinaison grâce à l'intermédiaire d'un autre, et il n'y a aucune absurdité à comparer le rôle des molécules de ces corps à celui des organes de transmission dans nos machines.

Enfin cette théorie fait comprendre comment la ligne de démarcation admise entre l'affinité chimique et l'attraction moléculaire homogène est infiniment peu tranchée, et comment la distance que l'on croyait autrefois exister

entre ces deux forces va chaque jour diminuant. On voit que l'attraction homogène favorise souvent les combinaisons chimiques, non en vertu d'une action prédisposante, comme on l'avait pensé d'abord, mais parce que, au moment où, par la combinaison, un corps passe à l'état solide, il se supprime du milieu de la masse et ainsi l'action de la portion restante n'est plus empêchée. En outre, certains mouvements prennent naissance, qui facilitent le mélange des parties, dégagent la chaleur nécessaire pour accélérer et favoriser la combinaison dans les autres points. Une véritable action prédisposante est absurde, car elle serait un effet de l'attraction homogène, précédant l'existence du composé lui-même; en un mot, ce serait l'effet préexistant à la cause.

Malgré toute la fécondité de la théorie ici exposée, nous ne nous illusionnerons pas jusqu'à penser que le moment est venu de pouvoir évaluer en nombres, poids et mesures toutes les réactions chimiques, à l'aide de considérations dynamiques. Pour arriver à un tel résultat il reste encore un chemin difficile à parcourir, et en pareil cas une théorie, parce qu'elle fait voir les choses de haut et d'une façon générale, est utile pour indiquer une voie nouvelle. On commence déjà à étudier les faits chimiques sous ce point de vue, et tout fait espérer que dans un avenir prochain la mécanique moléculaire sera aussi complétement connue que l'est aujourd'hui la mécanique céleste. Mais nous ne devons pas dissimuler que les difficultés dont il reste à triompher sont considérables, et il ne sera pas donné à la génération présente de contempler ce beau triomphe de l'intelligence humaine.

Chercher les relations mécaniques et les coefficients de conversion d'une force en une autre, voilà tout ce que nous pouvons faire. Ce travail difficile est déjà commencé, espérons qu'il sera poursuivi et perfectionné.

Nous avons signalé ci-dessus comment les nombres ex-

primant les intensités relatives de certaines propriétés moléculaires sont proportionnels plutôt aux volumes des corps qu'à leurs masses. Or M. Dupré a étendu au calorique dégagé dans les combinaisons chimiques les considérations que Cantoni avait fait valoir quand il considérait les variations des solides en les rapportant aux volumes et non aux masses, et il est arrivé à formuler la loi suivante : « Lorsque deux corps se combinent et forment 1 litre de composé pris à l'état gazeux, le travail chimique ou, ce qui est la même chose le calorique produit est un multiple d'un nombre fondamental constant Q supérieur de très-peu à une calorie. » La valeur moyenne de Q est 1,029 pour dix corps de nature différente soumis à l'examen. Donc, à envisager les volumes, les actions chimiques dégageraient des quantités de chaleur multiples l'une de l'autre, suivant des nombres très-simples. Ainsi l'acide chlorhydrique donne 1, l'eau et l'acide carbonique 3, l'acide sulfureux 4, etc. [1].

Lavoisier, par l'introduction de l'usage de la balance en chimie, fonda cette science sous le rapport des masses. Mais elle est encore toute entière à faire sous le rapport des vitesses, desquelles dépend la force vive ; c'est-à-dire, sous le rapport de la mesure des énergies ou pour envisager la question au point de vue purement expérimental, il reste à déterminer les équivalents calorifiques. Le jour où dans chacun des cas particuliers nous saurons estimer ces valeurs avec exactitude, ce jour-là la constitution des corps sera connue et la mécanique moléculaire sera constituée. Alors on s'étonnera qu'on ait pu professer, comme cela s'est fait jusqu'aujourd'hui, que les faits chimiques sont capricieux et bizarres, etc. Parler ainsi, c'est en réalité confesser notre complète ignorance.

[1] *Annales de chim. et phys.*, vol. I, IVe sér.

CHAPITRE V

GRAVITATION UNIVERSELLE

L'analyse des forces de la nature que nous avons essayé de développer dans cet ouvrage ne serait pas complète si nous ne consacrions quelques pages à la gravité. Est-ce à dire que nous ayons la prétention de révéler le mystère de la gravitation? Non certes, nous voulons seulement présenter à ce sujet une hypothèse conforme aux idées exposées dans les chapitres précédents.

Les manifestations de la gravité se séparent en deux classes principales. A l'une appartiennent les phénomènes de la chute des corps vers la terre; à l'autre les mouvements orbitaires des astres autour de leurs centres respectifs. Il fallut le génie d'un Newton pour reconnaître et démontrer que deux ordres de phénomènes aussi éloignés dérivaient d'une même cause. Jusque-là on avait bien la notion confuse d'une certaine force qui gouvernait le cours des astres, mais personne n'en avait formulé les lois d'une manière précise et l'on n'avait jamais prouvé qu'elle fût identique à la force qui précipite les corps graves vers la terre.

Lorsque les observations de Tycho-Brahé sur les comètes eurent prouvé que les sphères solides n'existaient pas, on chercha quelle cause retenait les planètes dans leurs orbites. Copernic, occupé tout entier à simplifier et à rectifier les lois géométriques du système planétaire, ne traita la question théorique que secondairement. Il remarqua seulement que la matière tendait à prendre une figure sphérique et que, par suite, les corps tendaient au centre de la terre non comme au centre du monde, mais comme au centre d'une sphère.

Galilée en découvrant les lois de la chute des graves, reconnut que tous les corps étaient également attirés, ou plutôt également sollicités par la terre, et de ce moment disparut de la philosophie naturelle une foule d'erreurs, telle que la distinction des lourds et des légers, la tendance vers les diverses sphères, etc.

Kepler, cette puissante intelligence passionnée de l'ardeur des découvertes, voulait à tout prix surprendre le secret des mouvements célestes ; il regarda le soleil à la fois comme centre de mouvement et de force, et n'hésita pas à affirmer que de cet astre émanait la puissance qui retenait les planètes dans leurs orbites, de même que de ce foyer central rayonnaient chaleur et lumière. Les idées très-obscures, alors régnantes sur la nature de la lumière, l'empêchèrent de se former une idée nette de la manière dont s'accomplit cette action. Aussi quand il voulut identifier la cause des mouvements célestes avec celle de la lumière, la considération des ombres fut pour lui une difficulté insurmontable, et ce fut le magnétisme qu'il adopta comme principe initial. Pour lui, le soleil était un gigantesque aimant qui retenait les planètes dans leurs orbites.

Non qu'il attribuât cet effet à la force attractive magnétique [1] ordinaire, il supposa que le soleil exerçait une action directrice provenant de ce que ses rayons étaient entraînés dans un mouvement circulaire par la rotation du soleil lui-même, rotation qu'il devina longtemps avant qu'elle fût constatée par l'observation directe. Et il arriva à dire d'une façon encore plus explicite que l'on doit se figurer les planètes plongées dans le tourbillon éthéré qui enveloppant le soleil, est le principe de son action magnétique.

[1] Kepler, *De stella Martis*, liv. III, cap. XXXIV, p. 176, lig. 22 et ch. LVII, p. 185.

A la même époque, Gilbert soutenait que la lune tourne autour de la terre, que si elle soulève les eaux de nos océans, c'est par une influence magnétique ; en un mot, l'aimant symbolisait toutes les forces attractives, si bien que ces idées venaient appuyer celles de Kepler. Cet homme remarquable doit donc être regardé comme le véritable auteur de la théorie des attractions et des tourbillons à laquelle Descartes sut donner une si grande popularité.

Ces systèmes partaient tous d'un principe faux, savoir que la translation d'une planète suppose la circulation effective de quelque matière autour d'un centre. On n'avait pas encore pensé à expliquer un mouvemeut curviligne par la combinaison d'une impulsion instantanée avec une force continue centrale. Le premier exemple d'une telle composition de mouvement fut trouvé par Galilée pour le cas de la parabole ; on en trouve un autre dans Borelli pour le cas du mouvement circulaire, mais la clarté de la démonstration laisse à désirer. Cet auteur fait voir comment la force centrifuge qui prend naissance dans tout mouvement circulaire peut arriver à contre-balancer la force centrale agissant sur le corps, laquelle peut être le magnétisme ou la gravité, puis il s'efforce de donner du fait une vérification expérimentale[1]. Il arrive même à cette conclusion fort remarquable que, pour comprendre les mouvements planétaires, il n'est point nécessaire d'admettre ni des intelligences spéciales, ni une influence magnétique, ni un éther de densité variable au sein duquel les astres sont suspendus, que tout s'explique par une simple tendance de ces corps vers le soleil, tendance semblable à celle de tous les corps vers le centre de la terre. Cette tendance dirigerait les planètes vers le soleil, et les satellites vers la planète autour de laquelle ils tournent, en se

[1] Borelli, *Theoria Medicæorum planetarum*. Florence, 1866, p. 47.

combinant avec une impulsion initiale, comme cela se passe dans une fronde. Malheureusement, à propos de cette seconde force, il revient aux tourbillons éthérés, car ses idées très-confuses touchant l'inertie ne lui permettaient pas de comprendre qu'un mouvement se peut conserver sans être entretenu.

L'ouvrage de Borelli parut au moment où Newton commençait sa carrière scientifique, et alors les études de mécanique avaient atteint un très-haut degré de développement. En France, Huyghens s'occupait spécialement des forces centrifuges, Halley vulgarisait le système de Kepler; Hooke était parvenu à réaliser expérimentalement le mouvement elliptique (autour d'un centre et non d'un foyer, autant qu'on peut le croire). Enfin Bulliauld avait fait remarquer que la force planétaire devait être en raison inverse du carré des distances, rectifiant ainsi l'inconcevable erreur de Kepler qui avait donné comme rapport la raison inverse simple.

A toutes les époques de grande activité scientifique il apparaît un puissant génie qui, mettant à profit les matériaux grossiers et incomplets épars çà et là, les réunit, leur donne la forme et les assemble en un tout homogène; la moindre trouée faite à grand'peine par ses prédécesseurs devient une large brèche qui lui ouvre une voie nouvelle et lui laisse voir les vérités les plus inattendues. Il en fut ainsi pour Newton. Il eut le bonheur d'arriver à un moment où se trouvaient préparés tous les éléments du problème à la solution duquel il appliqua sa vaste intelligence, et en six mois il put concevoir et élaborer l'immortel ouvrage des *Principia.* Telle est l'histoire de la marche de l'intelligence humaine vers la solution de ce grand problème. Dans ces derniers temps, on a voulu tout bouleverser en se fondant sur des autographes très-mal fabriqués. Nous ne nous arrêtons à les mentionner que pour déplorer un si grand abus de la bonne foi du public.

Avant Newton, on croyait que le principe de la gravité résidait dans le centre des planètes.

Al punto
A cui si traggon d'ogni parte i pesi [1].

Il prouva qu'au contraire la force de gravitation se retrouve dans chaque molécule et qu'une action réciproque s'exerce entre toutes les parties de la matière terrestre et planétaire. Par des considérations tirées de la forme des orbites cométaires et de la troisième loi de Kepler, il démontra que les planètes ne sont pas tenues dans leurs orbites par des tourbillons, comme le supposait Descartes, et que, pour expliquer les mouvements célestes, il suffit de deux forces, savoir : l'inertie qui avec l'impulsion initiale constitue l'élément tangentiel, et une force continue centrale qui n'est autre que la gravité. Cette force est inséparable de la matière, et décroît, comme toutes les actions émanant d'un centre, en raison du carré de la distance.

Mais la force planétaire une fois identifiée à la gravité terrestre, la loi de son action démontrée n'en fut pas mieux connue, quant à sa nature. On savait seulement qu'elle se fait sentir jusqu'aux limites les plus reculées de la création. Bien plus, Newton se borna à énoncer sur ce point quelques idées générales, sans assigner d'origine positive à cette force. Il accepta comme fait que l'accélération d'un corps vers un autre, (c'est-à-dire la vitesse qu'il prendrait dans la première unité de temps si l'intensité restait constante pendant toute cette durée), est inversement proportionnelle au carré des distances. Cette vitesse fut nommée force accélératrice, non pour indiquer quelque principe spécial inhérent aux corps, mais seulement parce qu'elle est l'effet et la mesure de la cause du mou-

[1] Le point où tend tout ce qui pèse. (Dante, *Enfer*, c. XXIV.)
(*Note du traducteur.*)

vement, quelle que soit du reste cette cause[1]. L'espace correspondant à cette vitesse sur la surface terrestre est celui que parcourent les graves en tombant pendant la première seconde de temps : dans les orbites planétaires, c'est la quantité dont ils s'écartent de la tangente. La géométrie ne nous dit rien de plus, le reste est affaire de spéculation philosophique ; et Newton (cela a déjà été signalé ci-dessus) n'a jamais nié que cet espace pût être parcouru par l'impulsion d'un milieu.

L'ignorance de la cause n'empêcha point de découvrir les lois géométriques des mouvements célestes, et l'accélération étant acceptée comme fait, on put rendre compte de toute la mécanique des astres avec une exactitude que ne démentirent pas les observations astronomiques les plus parfaites ; on put encore expliquer le flux et le reflux de la mer, la figure de la terre, l'attraction par les montagnes, etc. Et il fut prouvé que tous ces phénomènes, considérés par Gilbert et Kepler comme des effets du magnétisme, résultaient de la tendance des graves au centre de la terre, ainsi que Borelli l'avait indiqué.

Dès lors, puisqu'il n'y avait aucune nécessité absolue de connaître la cause de la gravitation, et que c'était là une question hérissée de difficultés, jusqu'à ces derniers temps les physiciens se gardèrent de toute spéculation de ce genre, et même ils auraient pensé nuire à leur réputation scientifique, en essayant d'expliquer l'origine de la force planétaire. Ce problème a cessé d'occuper les astronomes, on l'a regardé comme se rattachant à l'étude de la matière, et ainsi il est échu aux physiciens. Ceux-ci depuis quelques années, ont commencé à ne plus montrer autant d'éloignement pour ce genre de recherches, et nous avons pu le constater maintes fois dans le cours de cet

[1] « Par le mot force j'entends une pression qui produit un effet sur le mouvement des corps qui sont libres. » Airy, *Six lectures on astronomy at Ipswich*, etc., p. 112.

ouvrage. Ils sont beaucoup moins réservés à ce propos, et sans formuler encore une solution définitive, ils ne doutent plus qu'il soit possible, en faisant intervenir l'action mécanique d'un milieu, de réduire toutes les forces de la nature, sans excepter la gravité, à un seul principe.

Encouragés par la tendance des idées modernes, nous n'hésiterons pas à pousser notre induction jusqu'à ce dernier terme. Pour cela il n'est pas besoin d'introduire de nouvelles hypothèses, de fonder de nouvelles théories, il suffit d'appliquer les principes généraux, exposés dans le troisième chapitre du présent livre, et relatifs au mode de développement d'une attraction. Nous avons vu que chaque molécule pondérable est un centre de mouvement, et par suite le centre d'une sphère éthérée de densité croissante en allant du centre à la circonférence. A cause de cette différence de densité, quand deux sphères se pénètrent réciproquement, deux points quelconques appartenant chacun à l'une d'elle, ne peuvent plus se déplacer dans tous les sens avec une égale facilité; cette facilité est plus grande sur la ligne qui les unit; cela se résout en un rapprochement de deux points, autrement dit en une attraction apparente. Donc une attraction ne suppose pas nécessairement une véritable force impulsive extérieure, mais elle peut très-bien se produire en vertu de cette loi générale du mouvement, que si un corps en choque deux autres de masse inégale, le transport qu'il éprouve se fait surtout du côté de la moindre masse. Or, dans le cas actuel, la couche de moindre densité agit de même qu'un corps de moindre masse.

Ce qui est applicable à chacun des centres en particulier doit s'entendre également d'un groupe de centres. Un corps fini quelconque, une planète quelconque, étant un agrégat de ces mêmes centres en nombre déterminé, autour de tels systèmes se forme nécessairement une sphère à l'intérieur de laquelle la densité de l'éther sera d'autant

moindre que le nombre des centres sera plus grand. Donc la force résultante croîtra proportionnellement à ce que nous nommons la *masse*, et décroîtra pour chaque centre toujours suivant sa loi élémentaire; mais dans le groupe formé elle pourra varier avec la forme des volumes et la distribution des parties. Supposons un corps quelconque, et ce peut être une planète, dont les particules sont animées de mouvements semblables, plongé dans la sphère qui enveloppe un autre corps, la résultante des mouvements intérieurs entraîne le premier vers le second suivant la droite qui va de l'un à l'autre, comme on l'a dit pour deux centres élémentaires, parce que le long de cette ligne se trouve la moindre résistance au déplacement des deux corps. Ainsi la gravité est réduite en quelque sorte à un effet de pression statique, mais ce jeu de pression reconnaît lui-même pour cause le mouvement.

La gravité diffère du magnétisme en ce que ce dernier phénomène est dynamique dans le sens rigoureux du mot; et que la différence de pression dépend en outre de la direction des rotations dans le milieu. L'action d'un aimant sur un fer doux s'affaiblit si on lui en présente un autre, parce que la force vive étant partiellement distraite par le second ne suffit plus à produire le même travail sur le premier. Pour la gravité, il n'en est pas ainsi et l'attraction exercée par un corps sur un autre ne diminue pas quand on en approche un troisième; car, d'après la manière dont elle est produite, chacun des corps agit par lui-même et ne développe aucun travail dans celui qui est près de lui, il détermine seulement un état particulier du milieu circonvoisin, et cet état est toujours le même, qu'il soit ou non en présence d'autres corps. Seulement si les corps sont disposés de telle manière que leurs actions soient concordantes, l'attraction est accrue, et diminuée au contraire quand elles se contrarient.

La gravité présente, au premier aperçu, de nombreuses

analogies avec les phénomènes électro-statiques qui, eux aussi, se réduisent à des effets de pression. Mais les deux forces se séparent nettement par leur manière d'être. L'électricité n'est qu'un état accidentel dû à l'accumulation de l'éther, et à sa condensation ou à sa dilatation; on peut jusqu'à un certain point la comparer à un mouvement qui, excité dans une masse fluide en repos, s'affaiblit à mesure qu'il s'étend et devient bientôt insensible. Pour la gravité, cet état de raréfaction dépendant de l'énergie propre aux molécules primitives de la matière, et qui les anime toutes également, ne peut devenir moindre. Une autre différence essentielle consiste en ce que, dans la gravité, nous ne connaissons aucun fait d'induction comme dans l'électricité. Cela tient à ce que l'état électrique, par sa grande puissance, trouble la constitution même des atmosphères moléculaires, tandis que cette influence est insensible dans la gravité qui est un effort incomparablement plus faible. A certains égards la gravité pourrait être attribuée à un état électrique, dans ce sens qu'au sein des corps pondérables l'éther est plus raréfié, à peu près comme cela a lieu dans les corps électro-négatifs, si bien que poursuivant cette idée nous arriverions à dire que la terre ou un astre quelconque est par rapport à l'espace dans un état électrique négatif. Cette opinion a été déjà avancée avant nous, mais nous n'accepterons cette manière de parler qu'en lui donnant son acception la plus large, parce que l'état électrique est à nos yeux la rupture d'équilibre moléculaire qui, dans un fluide, l'éther, accompagne toute modification momentanée, et non celle qui est inséparable de l'existence de la matière. Donc, en général, on ne doit pas confondre la gravité avec l'électricité.

De même, il ne faut pas identifier la gravité avec la lumière ni avec la chaleur; car, bien que ces effets résultent l'un et l'autre d'une agitation moléculaire, cependant la modification du milieu n'est pas semblable dans les deux

cas. En effet, la lumière et le calorique rayonnant sont dus à la vibration, effet de l'élasticité ; l'élasticité, dans les groupes de molécules, n'est rien plus qu'un phénomène secondaire, comme on l'a vu au livre précédent, tandis que dans les atomes elle s'explique par le rebondissement résultant du mouvement de rotation combiné à celui de translation. Dans les deux cas son effet est de transporter complétement la force vive d'une couche à l'autre du milieu, qui reste au repos aussitôt que l'ébranlement est passé. Au contraire la dilatation, de laquelle dépend la gravité, a son origine dans les mouvements atomiques de progression; elle s'exerce d'une manière continue en vertu de la force de projection qui anime les molécules ou les atomes et les tient séparés. Les impulsions successives ne s'entre-détruisent pas, mais s'ajoutent les unes aux autres jusqu'à ce qu'elles soient contre-balancées par la réaction réciproque des divers centres soit voisins, soit éloignés. Cette dilatation élémentaire, qui se développe autour de chaque centre, ne saurait cesser sans que le centre de mouvement ne s'anéantisse lui-même, et alors le milieu reprendrait *avec le temps* un nouvel état d'équilibre, de même qu'après la décharge d'un corps électrisé une nouvelle distribution s'établit dans le milieu.

Qui a bien compris les explications précédentes voit aisément que la gravité doit être tout à fait indépendante de la température, et cela pour deux raisons : 1° parce que les variations thermiques appartiennent surtout aux mouvements de la matière pesante et non, à proprement dire, à ceux de l'éther; 2° parce qu'en ajoutant de la force vive calorifique à un système, le travail que nous produisons se réduit à un éloignement des centres, et ainsi ce qu'il est possible d'obtenir, c'est une *diminution de la gravité dans un certain espace défini.* Soit un cube ayant 1 mètre de côté, on le chauffe, son volume augmente, une portion de matière est expulsée du volume du mètre cube, et

réellement dans cet espace *la gravité est moindre*. Sous ce rapport, il est permis de dire que la chaleur diminue la gravité, dans un espace donné, en diminuant la quantité de matière que peut renfermer un certain volume. Mais cela n'altère en rien les atmosphères primitives produites par le mouvement primordial; mieux encore, cela suppose qu'elles subsistent et se renforcent, et cet éloignement de leurs centres a pour résultat de faire cesser certaines influences dues aux enveloppes communes ou tourbillons généraux dont nous avons parlé dans le chapitre précédent. Toujours est-il que les centres primaires de mouvement demeurent sans nul doute inaltérables, et par suite la gravité dans ces centres, bien que, *par la chaleur, elle varie au sein d'un espace de dimensions déterminées*.

Voilà à quelles conclusions on arrive en considérant la question au point de vue théorique. Lorsqu'on la traite expérimentalement, c'est-à-dire lorsque par l'observation on essaye de s'assurer si réellement la gravité ne subit aucune altération de la part de la chaleur ou énergie thermique, nous devons avouer franchement que l'expérimentation n'a pas encore fourni une réponse décisive. Des recherches ont été faites dans cette voie, nous le savons, mais il est permis de se demander si elles reposent sur des bases bien rigoureuses. En effet, nos expériences ne peuvent embrasser qu'une étendue fort restreinte de l'échelle thermométrique; c'est-à-dire que les variations de force vive, qu'il est en notre pouvoir de produire, sont bien petites relativement à l'énorme force vive dont sont animées les molécules, ainsi que nous l'avons reconnu plusieurs fois en comparant les énergies absolues des forces vives moléculaires, avec les variations que nous leur faisons subir. En outre la gravité est une portion bien minime de la force qui constitue les attractions moléculaires, si bien que, encore qu'il nous serait donné de pouvoir altérer ces forces plusieurs millions de fois plus que nous ne pouvons le faire,

il n'en résulterait aucun effet sensible. Rappelons-nous que l'attraction réciproque de 2 kilogrammes de matière ayant une densité égale à la densité moyenne de l'eau, et placés à 1 mètre de distance, étant rapportée au mètre et à la seconde de temps, est 0,000 000 000 069 30. Cet exemple suffit pour nous montrer combien nous sommes loin de pouvoir reconnaître si la gravité est ou non altérée par la température, attendu qu'à cet effet il nous faudrait connaître la valeur de cette force avec une exactitude de beaucoup supérieure à celle que comportent nos expériences. Quant aux planètes, nous ne savons pas si cet élément entre ou n'entre pas dans la constante que nous nommons *masse*, car les expériences ordinaires faites avec des pendules, ou avec la balance de Cavendish n'ont pas encore été réalisées dans des conditions d'exactitude satisfaisantes, et il n'a pas été possible d'en faire varier les conditions dans des limites suffisamment étendues. Il est cependant un cas dans lequel la réduction de la gravité à la vibration peut avoir lieu, c'est celui dans lequel la radiation thermique augmentant l'oscillation élémentaire des atomes, et dilatant la sphère d'éther raréfié, l'action moléculaire ne serait pas seule troublée, mais aussi celle qui constitue la gravité. Aussi ne doit-on pas taxer d'absurdité ceux qui admettent la transformation possible de la chaleur solaire en force de gravitation, et qui, à l'exemple de Kepler, regardent la gravité et la chaleur comme dérivant probablement d'un seul principe.

Le plus ordinairement les ruptures d'équilibre, survenues à la suite des opérations thermiques, se résolvent en mouvements d'électricité, laquelle contrarie l'action de la gravité et en surmonte les effets; mais ces mouvements électriques ne sont que des phénomènes accidentels, qui modifient le corps seulement dans une très-faible partie de la masse; à peine peut-on les considérer comme antagonistes d'une activité aussi générale

que celle qui constitue la force fondamentale de l'univers.

Quand on envisage la gravité comme une pression, on s'explique pourquoi il n'est pas possible de mettre en évidence sa propagation successive; en effet, pour y arriver, il n'y a que deux procédés également irréalisables dans l'ordre présent de la nature, savoir : la destruction, ou la création d'une masse quelconque. La propagation successive du mouvement vibratoire, bien que très-rapide, se prête à l'observation parce que le mouvement commence et finit avec chaque pulsation, et qu'il est arrêté par les corps opaques. Mais pour la pression qui donne lieu à la gravité, il en est autrement; la modification du milieu ambiant est permanente; seulement lorsque le centre se déplace elle se renforce à mesure qu'il s'approche d'un autre corps; et le changement ayant lieu peu à peu, et par simple effet différentiel, avec une vitesse immensément supérieure à celle du corps en mouvement, sa variation ne se distingue pas de celle-là même qui est propre au lieu occupé par le corps. Sans doute en imaginant un nouveau centre de matière créé dans l'espace, il y a tout lieu de croire que l'action de gravité emploierait un certain temps à se transmettre à distance comme le fait l'onde électrique en parcourant un fil; mais toute vérification de ce genre dépasse les limites de notre observation.

La gravité imprime à tous les corps la même vitesse dans l'unité de temps. Ce fait découvert par Galilée prouve que les molécules, quelle que soit leur nature chimique, sont également sollicitées vers la terre, propriété qui s'accorde avec la remarque faite à propos de la chaleur, que les atomes élémentaires quand ils sont de masse égale doivent avoir une capacité calorifique égale; cela revient à dire que dans les deux cas l'inertie est la seule force à surmonter, et qu'une quantité donnée de mouvement produit toujours la même quantité de travail, que ce soit en pro-

duisant la dilatation d'où naît la gravité, ou en excitant la vibration thermique. Un tel résultat est un argument d'une haute importance en faveur de l'opinion que nous soutenons, et confirme une fois de plus la validité du raisonnement sur lequel nous avons fondé la théorie de l'unité des forces physiques.

Du moment que la gravité est l'effet d'un milieu, ce n'est pas dans les centres d'attraction eux-mêmes, mais dans l'espace étendu autour des corps attirés, qu'il faut chercher les causes du mouvement acquis par les corps pendant leur chute vers les centres. Une planète en tombant vers le soleil acquiert une certaine quantité de force vive par la réaction du milieu environnant, mais une égale quantité de force vive est perdue par le milieu, de même que lorsqu'un corps pesant tombe dans l'eau, le travail positif qui l'a élevé à la hauteur d'où il est tombé est précisément égal au travail négatif employé par l'eau pour se déplacer et s'abaisser au moment ou elle est frappée par le corps.

On comprend encore pourquoi à cause de cette réaction du milieu environnant il peut se faire que l'inertie de l'éther insensible lorsqu'il s'agit de masses compactes telles que les planètes, ne le soit plus lorsqu'il s'agit de masses réduites à un grand état de rareté. Évidemment alors, à la résistance tangentielle se pourra ajouter une résistance dirigée suivant le rayon, ce qui expliquerait certains phénomènes observés dans les comètes, qui jusqu'ici ont été attribués à une force répulsive émanée du soleil. Les formes de ces astres errants mettent hors de doute que la gravité n'est pas la seule force qui règne dans les espaces planétaires; si elle dérive de l'action d'un milieu, ce dernier produit très-certainement les accélérations des mouvements moyens des comètes et le rebroussement de ces jets qui se dirigent du côté du soleil. Les calculs de Plana ont démontré, à la vérité, que rien ne prouve l'existence

d'une force répulsive lorsqu'on considère les mouvements du centre de gravité des comètes à courte période, mais ils n'ont rien démontré relativement à l'explication des formes et autres phénomènes physiques que ces corps nous présentent[1].

Ces réflexions, loin de satisfaire notre curiosité sur la cause des forces cosmiques, ne font que l'exciter davantage, toutefois elles peuvent hâter la solution de ce problème délicat pourvu que l'on ne se presse pas de conclure trop tôt. Un milieu résistant étant admis par les astronomes afin d'expliquer les phénomènes cométaires, plusieurs d'entre eux le regardent comme différent de l'éther lumineux et acceptent volontiers qu'il est constitué par la lumière zodiacale; mais cette opinion n'est pas partagée par tous les savants. Il est bon de faire remarquer que jusqu'à ce jour on n'a reconnu aucune influence sur la comète rétrograde de Halley, dont le passage au périhélie aurait dû présenter un retard de sept jours d'après les calculs de Rosemberg si elle avait éprouvé une résistance égale en intensité à celle que subit la comète de Encke[2]. Il est encore manifeste que la réaction doit dépendre aussi de la force spéciale avec laquelle les diverses comètes lancent leur matière par effet d'expansion, laquelle force n'est pas assurément la même dans toutes. De là, cette espèce de force élective soupçonnée par Faye qui, suivant qu'elle est d'une nature ou d'une autre, donne naissance à des queues de forme variée, etc. Les observations récentes faites par nous sur les étoiles filantes et leur connexion avec les comètes ont prouvé qu'il n'y a pas

[1] Plana. Mémoire sur l'intégrabilité des équations différentielles, relatives au mouvement des comètes, dans l'hypothèse de M. Faye, 1860. (*Ac. de Turin*, t. XXI, sér. II.)

[2] Il a été reconnu que la prétendue résistance, à laquelle on croyait soumise la comète de Faye, n'existe pas; la différence résulte des perturbations ordinaires, comme on l'a établi par des calculs plus rigoureux.

communauté d'origine entre ces astres et la matière qui forme notre système planétaire. Nous avons aussi constaté qu'elles sont gazeuses et donnent un spectre simple, analogue aux spectres des nébuleuses et des substances chimiques pures en vapeur. Il y a donc là des forces en jeu très-différentes de la gravité, et, conséquemment, il ne faut pas s'étonner si elles présentent des phénomènes que la gravitation seule ne permet pas de calculer.

Comme complément de ce que nous avons dit de la résistance du milieu planétaire, il ne sera pas hors de propos de rappeler ici les récents travaux de M. Heinrichs. Ce savant pense qu'il existe réellement une faible résistance de la part de l'éther lumineux, mais si petite que son effet sur les planètes ne se manifeste qu'avec une lenteur excessive, à cause de la masse et de la densité très-grande de ces astres. Si par exemple chaque année la terre se rapprochait du soleil de 10 pieds anglais (3 mètres environ) la durée de l'année serait accrue d'une seconde en mille ans. Or l'astronomie est bien loin de pouvoir assurer qu'un effet de ce genre n'existe pas. Le même auteur regarde comme une preuve de cette résistance des espaces célestes le fait que les distances des planètes au soleil, bien que sensiblement représentées par la loi de Titius[1], ne le sont cependant pas exactement; et les planètes comme les satellites, qui s'écartent le plus de la loi, sont précisément ceux sur lesquels, d'après sa théorie, la résistance du milieu interstellaire exerce l'influence la plus marquée. Probablement à l'origine la loi en question se vérifiait rigoureusement, et à présent elle se trouve en désaccord avec l'observation, à cause de la résistance de

[1] La loi que l'on a pris l'habitude d'appeler loi de Bode doit être nommée loi de Titius. Cette prétendue loi a été indiquée pour la première fois dans une traduction allemande de la *Contemplation de la nature*, de Bonnet, publiée à Wittemberg, par le professeur Titius. (*Note du traducteur.*)

l'éther. De même que les couches géologiques qui, lors de leur formation, se sont déposées horizontalement, ont été plus tard soulevées de diverses manières par des causes secondaires, ainsi cette loi se trouve maintenant troublée et pour ainsi dire déformée [1].

De ces principes résulterait encore que les systèmes secondaires les plus éloignés du soleil sont les plus anciens, conséquence parfaitement en accord avec l'hypothèse de Laplace qui considère notre système planétaire comme formé aux dépens d'une immense nébuleuse.

Sans donner ces théories comme des certitudes, nous dirons que les phénomènes physiques accessibles à nos moyens d'observation démontrent réellement la résistance du milieu éthéré au sein de la matière pesante, dans les cas où il est animé d'une vitesse et d'un mouvement extraordinaire, ainsi que cela se voit dans les expériences d'induction électro-magnétique; mais pour ce qui est des planètes, on ne peut réellement encore rien décider. La résistance d'un milieu en diminuant les axes transverses, et par suite en altérant les mouvements moyens, changerait les rapports de tout le système planétaire, y compris les durées des rotations; et alors nous ne nous en apercevrions pas, vu la période peu étendue des observations exactes dont les résultats sont conservés. La seul moyen de reconnaître si les proportions du système solaire varient réellement consisterait à effectuer de temps en temps des mesures de parallaxes. Or la détermination de cet élément, même pour le soleil est tellement incertaine qu'on a cru nécessaire de l'augmenter de $\frac{1}{30}$ dans le cours de l'année 1863, et on a augmenté également un peu la parallaxe de la lune [2]. Mais on ne peut tirer de là aucune conséquence sérieuse. Cette correction a été faite non pas à la suite d'observations reconnues

[1] Heinrichs Silliman, *American Journal*, jan. 1864.
[2] *Month. Notices*, *R. ast. Soc.* London 1864.

plus exactes que les premières : c'est surtout une correction de calcul. La trop facile valeur de la parallaxe qu'on avait adoptée d'abord, résultant de la façon inexacte dont on avait interprété les observations, celles-ci, mieux discutées, ont permis de ramener la parallaxe à sa juste valeur. Ce fait ne permet donc pas de conclure à une variation quelconque de la distance du soleil à la terre, mais il est très-propre à montrer toutes les difficultés du problème. Cette correction du reste était commandée par d'autres considérations théoriques tirées des perturbations planétaires, et de la vitesse de la lumière déterminée dans ces dernières années par des expériences directes. L'observation récente d'un passage de Mars a permis de mettre à profit toutes ces données; reste à savoir si les résultats obtenus seront confirmés par les passages prochains de Vénus sur le soleil.

La gravité étant un effet de mouvement, doit nécessairement donner naissance à tous les effets qui dérivent directement du mouvement. Nous avons vu, par exemple, que la force vive produite par la pesanteur se transforme en chaleur par le fait de la chute des corps, et peut ainsi engendrer toutes les forces liées à ce dernier agent. A la surface de la terre elle est en lutte continuelle avec les actions moléculaires, et sa pression est constamment équilibrée par ces forces; de telle sorte que le repos absolu n'existe pas, il y a seulement un conflit incessant entre des actions opposées. Mais, nous demandera-t-on, le mouvement calorifique est-il convertible en gravité? D'après l'hypothèse adoptée ici, une telle transformation n'est pas impossible; car, puisque dans les deux genres de phénomènes les effets sont dus à un mouvemement particulier, ces deux mouvements peuvent se convertir l'un dans l'autre, de même que dans un corps en rotation le mouvement de *réflexion* peut devenir *progression* et réciproquement.

De cette manière et par l'action réciproque de tous les centres de la matière, la chute continuelle des planètes vers le soleil est capable de restituer à l'astre central par l'intermédiaire de l'éther une portion de la force vive qu'il perd continuellement sous forme de radiations. Peut-être est-ce là le mode, suivant lequel s'équilibre dans les planètes l'énergie mécanique, qui, arrivant du soleil à leur surface, semble devoir s'accumuler dans leur masse indéfiniment, par le fait des actions chimiques et thermiques emmagasinées en elles[1].

Le problème de l'équilibre de la force dans le système solaire et de la permanence de la température du soleil, a toujours été une question scientifique de premier ordre; aussi a-t-elle exercé la sagacité de tous les philosophes. Newton croyait que les comètes étaient destinées à restituer au soleil la matière qu'il perdait par l'émission lumineuse. Aujourd'hui qu'on a prouvé que la lumière est un mouvement, on a cru trouver une cause de réparation de l'énergie mécanique perdue dans la force vive que développeraient les aérolithes par leur chute sur le soleil. (Waterston.) Mais cette hypothèse soulève de nombreuses difficultés. Au contraire, sans recourir au choc de masses pesantes, on arrive à concevoir parfaitement le maintien de l'équilibre par la réaction réciproque des parties du système. A la vérité, ici la difficulté est plutôt théorique que pratique. En parlant de la dissociation, nous avons calculé que le soleil peut continuer à rayonner plusieurs millions d'années durant, sans que sa température diminue d'une quantité perceptible, ainsi nous ne pouvons pas savoir, s'il est ou non constant. D'ailleurs rien ne prouve qu'il doive nécessairement rester *éternellement* invariable.

L'architecte suprême, qui par les voies les plus diverses a assuré ce que nous appelons régénération de la matière,

[1] Voy. plus haut, liv. II, ch. IV, p. 207.

c'est-à-dire la conservation de son activité au milieu de ses transformations incessantes, n'a certainement pas laissé sans causes réparatrices la source d'où dérive toute force vive à la surface des corps du système planétaire. D'après le principe établi plus haut l'équivalence réciproque doit exister, mais il est difficile de décider si elle est telle, qu'elle soit en progrès et en activité continue, ou bien si la compensation s'établit à des époques déterminées, à des moments critiques irréguliers ainsi que cela se passe dans les systèmes d'ordre inférieur. Notre science ne peut le savoir, parce que là le temps se compte à la mesure de celui pour qui « *mille années sont comme le jour d'hier qui vient de s'écouler* ». Aussi il est rationnellement permis de supposer que le soleil peut être soumis à des variations alternatives dont les périodes sont telles que leurs lois nous échappent complétement. Une chose certaine aujourd'hui, c'est que, pour trouver la source de la température solaire actuelle, il suffit de la considérer comme résultant de l'agglomération de cet astre et de sa condensation aux dimensions présentes. Cette agglomération dérive de la chute de la masse de l'astre central des limites de la nébuleuse primitive à la distance actuelle du centre, et cette chute a suffi à développer la température que le soleil possède de nos jours.

En résumé, l'éther est probablement la cause de la gravité, et bien que répandu dans tout l'espace stellaire, il n'oppose à la marche des planètes aucune résistance sensible, soit à cause de sa très-faible inertie relativement à l'énormité des masses planétaires, soit comme l'avait admis Fresnel et comme semblent l'indiquer les récentes expériences de Fizeau[1], parce qu'il possède autour du soleil, dans chaque zone planétaire, une vitesse à très-peu près égale à celle des planètes elles-mêmes. Les comètes au con-

[1] Fizeau, *Comptes rendus*, 1859, vol XLIX, p. 717.

traire éprouvent de la part de l'éther une résistance très-sensible qui influence non-seulement la force tangentielle mais aussi la force centrale, et se traduit sous forme de répulsion solaire. Car, vu l'inclinaison considérable de leurs orbites et leur direction quelquefois contraire au mouvement du fluide éthéré, la circulation de l'éther gêne leur transport dans l'espace. Du reste, les phénomènes magnétiques confirment ces vues sur le mouvement circulatoire de l'éther. Que l'on ne nous reproche pas de ressusciter les tourbillons de Kepler et de Descartes, car pour nous l'éther n'est pas la cause agissante de la translation des planètes, il les accompagne seulement, et ainsi ne donne lieu à aucune résistance.

Voilà ce que nous voulions dire relativement à cette mystérieuse force de gravitation, et sans prétendre résoudre un problème aussi difficile, nous osons espérer que dans un avenir peu éloigné on arrivera à une solution complète qui ne s'écartera pas beaucoup des principes théoriques exposés dans ce chapitre.

CONCLUSION

Au moment de mettre la dernière main à ce travail qui a dépassé de beaucoup les limites dans lesquelles nous avions espéré le renfermer, nous ne pouvons nous empêcher d'engager le lecteur à jeter un coup d'œil d'ensemble sur le chemin parcouru.

Si, au lieu de s'arrêter aux derniers chapitres où sont traités les sujets qui excitent le plus la curiosité, le lecteur a eu la patience de suivre la discussion dans tous ses développements, il aura reconnu facilement quels immenses progrès l'esprit humain a faits dans la connaissance de la nature durant ces dernières années.

En présence des résultats partiels fournis par l'expérimentation, il sera persuadé qu'ils nous tracent la voie à suivre pour arriver à envisager les forces régissant la pure matière d'une façon beaucoup plus simple et plus précise qu'on n'a pu le faire jusqu'à présent.

Le résultat le plus important de notre analyse peut se formuler en quelques lignes. Toutes les tendances abstraites, les qualités occultes des corps, les nombreux fluides imaginés jusqu'ici dans le but d'expliquer les agents physiques, doivent être bannis du domaine de la physique, *car toutes les forces de la nature dépendent du mouvement.*

Il est rationnel d'admettre que le mouvement revêt dans les parties élémentaires de la matière la forme la plus générale sous laquelle il se présente dans une masse finie, c'est-à-dire celle d'un double mouvement de rotation et de translation. Par cette double qualité il devient indestructible dans la masse, car la mécanique enseigne qu'en vertu de l'inertie, il se conserve indépendamment de toute action spéciale qui l'entretienne. L'énergie qui lui a été communiquée à l'origine par le Premier Moteur se conserve en raison du même principe qui assure la conservation de la matière.

Ce principe nommé par les physiciens modernes principe de la conservation de l'énergie, n'est au fond, que le premier de ceux posés par Newton lorsqu'il formula les lois de la communication d'un mouvement, c'est-à-dire celui de l'égalité entre l'action et la réaction. Un corps complétement libre se meut naturellement en ligne droite et dans la direction de l'impulsion qu'il a reçue; si sur sa voie il vient à rencontrer une seconde masse il lui communique son mouvement, et alors il exerce une action qui passant du premier au second, est dite produire en lui une réaction égale. De ce principe résultent non-seulement les lois de l'échange de mouvement entre les corps au sein desquels il ne se développe aucune force interne, mais encore celles qui règlent la communication par le moyen d'autres corps tels que les leviers, les cordes, etc., qui constituent les machines. C'est lui qui donne la raison des formules nommées principe des aires, théorème des moments, principe de d'Alembert. Ce dernier dit en effet que dans un système donné il y a constamment équilibre entre les forces perdues d'une part et celles acquises de l'autre, et par là les problèmes de dynamique se trouvent ramenés à de simples questions de statique.

Le même principe s'applique encore au cas où les résistances sont continues et naissent soit du frottement, soit

de la cohésion, soit de la gravité, soit enfin de l'accélération du corps. En évaluant à chaque instant l'énergie de la cause agissante par le produit de la force *mv* par la vitesse instantanée; il résulte à la fin d'un temps fini, le produit $\frac{1}{2} mv^2$ que l'on nomme force vive, ou énergie, ou encore travail actif; et en évaluant la résistance ou réaction par la vitesse communiquée dans le même temps aux parties du corps, multipliée par l'intensité des forces résistantes, quelles qu'elles soient, c'est-à-dire en représentant le travail accompli par le produit de la force résistante et de l'espace parcouru à chaque instant, on trouvera constamment le travail passif égal au travail actif.

On n'a jamais émis le moindre doute sur l'exactitude de ces principes tant que l'on s'est occupé seulement du mouvement de masses pondérables, et il fut admis comme évident qu'avec de telles masses le mouvement perpétuel était impossible. Mais la nature mal déterminée, et du reste difficile à connaître, de certaines résistances et de quelques causes de mouvement, dites d'ordre physique, ne permettait pas d'appliquer ces formules à un grand nombre de faits, par exemple aux actions chimiques, à celles de l'électricité et de la lumière, et enfin surtout aux phénomènes de chaleur. Les recherches entreprises dans ces dernières années, ont prouvé la complète généralité des principes fondamentaux de la mécanique.

Les découvertes faites en optique, l'étude de la chaleur rayonnante avaient déjà persuadé les physiciens que le calorique est un phénomène de mouvement et qu'il devait en être de même de quelques actions chimiques; mais le fait récemment démontré de la transformation du calorique en force mécanique avec abaissement de température, les a conduits à diriger leurs investigations dans une voie nouvelle. On a reconnu que l'égalité entre l'action et la réaction existe non-seulement lorsqu'il s'agit des mouvements finis des masses, mais aussi des

mouvements moléculaires qui constituent ce que l'on appelle le calorique. Cette agitation des molécules est en nous la cause immédiate de la sensation de chaleur; en outre, la température et l'état physique des corps dépendent de l'intensité de la force vive animant les molécules, si bien que la température s'évalue d'après le travail des dilatations. C'est encore par le fait du mouvement calorifique que la matière passe à l'état de fluide élastique ayant pour caractère spécifique d'être expansif; d'une manière générale de ce mouvement résultent les forces dites répulsives ou diffusives.

Après une étude plus approfondie des propriétés de la matière, la nature des forces qui, nommées ordinairement attractions moléculaires, déterminent la formation des corps et leur donnent une forme déterminée, devint moins obscure, on reconnut qu'elles ne consistaient pas en des liens matériels réunissant les diverses parties constituantes, ni en des principes abstraits agissant à distance; mais qu'on devait les considérer comme un effet des mouvements qui animent les masses élémentaires. Tous les effets mécaniques et thermiques de la matière se réduisent simplement à changer des directions et à faire varier des vitesses dans les masses; et l'unique différence qui sépare les effets ordinaires de ceux d'ordre atomique réside en ce que dans les premiers, les mouvements sont très-apparents, tandis que les autres échappent à nos sens vu leur amplitude excessivement petite. Et si parfois la translation moléculaire paraît manquer, il n'en faut pas conclure que l'effet est nul, alors l'action s'épuise à modifier la rotation. Les plus petites masses moléculaires peuvent et doivent résister par cette même cause, et par la simple inertie, de même que nous voyons le tore d'un giroscope, par cela seul qu'il est en rotation, résister quand on cherche à changer sa direction, bien qu'il soit suspendu sur des supports d'une mobilité extrême.

En vertu de ces réactions le travail des forces au sein des masses est réduit à un simple effet dynamique, il doit donc être soumis à la loi générale de tous les mouvements. Au point de vue expérimental, une action mécanique quelconque se réduit au choc d'une masse, le choc des masses finies passant aux molécules intégrantes, se résout finalement en chaleur. Réciproquement de la chaleur dérive le pouvoir mécanique, sous forme soit de mouvement moléculaire chimique, soit de dilatation thermique, et tout se passe de telle sorte qu'une compensation parfaite s'établit dans le vaste ensemble de l'univers dont nous occupons un point; aussi serait-ce folie de prononcer sur ce qui passe aux dernières limites de la création, d'après la manière d'être de ce qui nous entoure[1].

Parce que l'action de la matière pondérable est seule perceptible à nos sens, il ne s'en suit pas qu'elle soit la seule dont il faille considérer les effets et l'influence. Il existe dans l'espace et à l'intérieur de tous les corps une matière plus subtile, qui par son inertie est capable d'éteindre les mouvements des masses pondérables, et, en vertu de ses conditions d'équilibre et de pression, peut maintenir les masses pesantes à leurs distances respectives, d'autres fois déterminer leur rapprochement; en un mot, et d'une façon générale, elle agit comme un fluide.

L'optique démontre la présence de cette matière subtile dans tout l'univers, c'est cette matière qui par sa vibration produit non-seulement la sensation de lumière, mais aussi excite des actions thermiques et chimiques entre corps placés à distance. Ce milieu, répandu au dedans de tous les corps diaphanes et opaques, par ses mouvements de

[1] Parmi les objections faites aux doctrines ici exposées, se trouve la suivante: Comment les choses se passent-elles aux limites du monde créé? Nous avouons sur ce point notre complète ignorance, mais cela empêche-t-il d'admettre les faits démontrés d'une façon palpable?

translation, est la cause des phénomènes qui constituent l'électricité dynamique et le magnétisme, enfin il entre en jeu dans les réactions chimiques. A l'état de flux il transporte la force vive d'un point à l'autre des masses mises en contact dans les systèmes voltaïques, et par ses pressions il donne lieu aux attractions et répulsions électro-statiques.

Ce milieu est formé par une substance qui essentiellement ne diffère pas de la matière commune, seulement il suppose une condition ou un état de la matière elle-même autre que celui sous lequel elle constitue les corps dits pondérables. L'état dont il s'agit est une complète désagrégation ou une atténuation telle que la matière, réduite à ses atomes élémentaires, pénètre partout, aussi bien dans les espaces planétaires qu'à l'intérieur des corps.

Quand la matière est dans cette condition, on la désigne sous le nom d'éther; elle n'a perdu aucune de ses propriétés essentielles. Elle est inerte et soumise à toutes les lois de la mécanique, et on ne peut l'appeler un agent immatériel que par un abus de mot, et seulement pour la contre-distinguer de la matière pesante. La résistance de l'éther aux mouvements de translation devient appréciable seulement dans des cas exceptionnels, alors que le corps est animé d'une vitesse énorme. L'éther ne paraît pas soumis à la gravité, parce qu'il est lui-même la cause de cette force et de toutes les attractions.

Le mouvement est la cause directe des répulsions, en tant que les molécules, si elles étaient libres et isolées, iraient en vertu de leur inertie se perdre dans l'espace, entraînées qu'elles seraient par l'impulsion reçues à l'origine; ainsi elles se sépareraient les unes des autres, et s'écarteraient indéfiniment. Mais, ces parcelles étant multipliées à l'infini dans des espaces limités, leur propre mouvement devient une cause indirecte d'attraction, en ce sens que chaque centre de matière de masse différente formant

l'atome simple, ou qui est constitué par un assemblage d'atomes vraiment élémentaires, devient en même temps le centre d'une moindre densité au sein du milieu lui-même. D'où résulte un déplacement des centres plus facile suivant la ligne qui les unit que dans les autres directions, ce qui produit les attractions et les pressions environnantes. Suivant l'amplitude et l'intensité du mouvement, dans ces sphères dilatées, sous l'influence des rotations, prennent naissance à diverses distances les attractions desquelles dérivent les propriétés chimiques et moléculaires des corps, et celles qui gouvernent les mouvements des astres. Jusqu'à présent il nous est impossible de dire comment les choses se passent dans chaque cas particulier, spécialement dans ces groupes de matière qui formant les corps organiques où les équilibres sont très-instables et déterminés par des causes fort complexes et des influences souvent toutes différentes de celles qui agissent ordinairement sur la matière brute.

Néanmoins, d'une façon générale, il est exact de dire que tout dépend de la matière et du mouvement, et nous revenons ainsi à la vraie philosophie, déjà professée par Galilée, lequel ne voyait dans la nature que mouvement et matière, ou modification simple de celle-ci par transposition des parties ou diversité de mouvement. Ainsi disparaît cette légion de fluides et de forces abstraites qui à tout propos étaient introduits pour expliquer chaque fait particulier. Il est vrai qu'à diverses reprises, surtout en Italie, plusieurs auteurs se sont élevés contre ces tendances scientifiques, mais nous avons aujourd'hui la satisfaction de voir les nouvelles doctrines défendues par les savants les plus distingués des autres pays.

Quoique nous nous refusions à admettre ces agents mystérieux, cependant jusqu'ici nous ne pouvons concéder que tous les phénomènes de la nature dépendent de ce seul principe nommé matière pondérable, et nous

croyons indispensable d'admettre l'existence d'une autre condition de la matière, échappant à l'influence de la gravité, matière qui n'est peut-être que la même matière grossière et pondérable parvenue à un degré de rareté et d'atténuation extrême. C'est elle qui donne lieu par ses mouvements divers aux phénomènes de la lumière, de l'électricité, du magnétisme, et de la gravité elle-même.

Si un jour on arrive à prouver qu'il est inutile d'admettre cette seconde condition de la matière, on ne fera que réduire toujours davantage le nombre des moyens dont la nature sert pour arriver à son but, et cela ne saurait porter atteinte au principe posé par nous comme fondamental qu'il suffit de la matière et du mouvement pour expliquer tous les phénomènes connus sous le nom de forces physiques.

Que l'on nous comprenne bien : nous ne voulons pas dire par là que toutes les questions sur les divers phénomènes de la nature sont résolues, et que dès lors de nouvelles recherches, et de nouvelles spéculations deviennent inutiles. Il reste encore à connaître comment les choses se passent dans une infinité de cas, par quel mécanisme s'accomplissent tels ou tels phénomènes spéciaux ; comment les faits se ramènent à des lois semblables. Malgré qu'on eût trouvé que les phénomènes célestes se réduisaient à des mouvements suivant des lois bien définies, on ne fut pas dispensé de poursuivre à grand' peine durant une longue suite de siècles l'étude de ces lois ; semblable remarque est applicable à la mécanique moléculaire. En considérant combien est encore imparfaite la dynamique des fluides pondérables, on ne s'étonnera pas de l'obscurité qui enveloppe plusieurs questions relatives aux effets d'un fluide impondérable, et l'on verra quels nombreux travaux il faudra entreprendre pour parvenir à jeter un peu de lumière sur ces problèmes difficiles.

Dès l'instant où l'on aura compris que tout se fait par

le mouvement, les recherches deviendront plus faciles, une nouvelle voie sera tracée qui conduira plus directement à la solution des problèmes, c'est-à-dire à l'explication des phénomènes; car un problème bien posé est déjà à moitié résolu. De même que la vraie chimie date du jour où fut reconnue la permanence des masses, de même on commença à donner une vraie théorie des phénomènes physiques seulement lorsqu'on songea à tenir compte de la quantité de mouvement ou de la force vive, et pour l'avoir fait les physiciens de notre époque ont attaché à leur nom une gloire impérissable. Un phénomène sera réellement expliqué lorsqu'on connaîtra la *quantité* de travail dépensée à le produire, et le *mode* de transformation du mouvement qui lui donne naissance. Mais nous sommes loin d'une perfection.

Cependant nous avons vu quels grands progrès on a fait dans cette voie en calculant les équivalents des diverses forces; détermination difficile dans un grand nombre de cas, mais elle est toujours possible; et ce qui reste à trouver n'est pas affaire de principe, mais plutôt de déduction. La découverte de la théorie mécanique de la chaleur a rompu la barrière qui fermait la route à l'intelligence de la mécanique moléculaire; et grâce à ce principe une foule des faits connus depuis longtemps ont reçu leur explication naturelle. La vaillante phalange de chercheurs, qui s'est lancée dans la carrière et la parcourt à grands pas, parviendra rapidement au but tant désiré. Les travaux théoriques sur la lumière et le magnétisme avaient préparé le triomphe de la science moderne que chaque jour voit grandir davantage.

A nous, modestes admirateurs de si beaux succès, il reste la satisfaction d'avoir mis sous les yeux du lecteur, le résumé des faits qui forment l'héritage intellectuel que la génération présente va, en y ajoutant encore, transmettre à celle qui la suivra. Un simple coup d'œil, jeté sur les

résultats obtenus au prix d'efforts sans cesse renouvelés, nous apprend que dans la nature tout se lie, et que tous les phénomènes de l'univers sont les innombrables anneaux d'une chaîne unique.

Lorsqu'on remonte ainsi aux principes fondamentaux, lorsqu'on cherche quelles sont les causes directes des phénomènes, on arrive bien vite à reconnaître la nécessité d'une *Cause première*, qui, par sa seule volonté, a dans l'origine assigné aux actions leurs limites d'intensité et a déterminé leur direction. L'homme ne peut que scruter cette première volonté du Créateur de laquelle découle comme effet médiat tout ce qui se présente à nos regards; si, lors de l'examen d'une machine, nous exaltons d'autant plus l'habileté de l'artiste que le principe d'action est plus simple et que l'intervention de la main du machiniste est moins souvent nécessaire, combien plus devrons-nous admirer l'œuvre de l'éternel Architecte. Mais quel homme peut espérer porter ses regards aussi haut! Les phénomènes observés par nous sont les plus grossiers de ceux que présente la création, une infinité d'autres resteront toujours complétement inaccessibles à notre court entendement. Les forces étudiées par nous sont comme la matière première qui forme le magnifique édifice de la création. Mais il s'en faut de beaucoup que nous puissions nous en expliquer les détails, les ornements pour ainsi dire, tel que l'organisation végétale et animale.

L'harmonie, la corrélation dans les quelques parties accessibles à notre intelligence apparaît d'autant mieux que nous les envisageons débarrassées de la multitude des faits de second ordre, qui nécessairement surchargent les cours élémentaires. Du point de vue un peu élevé auquel nous nous sommes placés, pas assez cependant pour effacer les détails, nous avons cherché à nous former une idée claire et précise de ce qu'est la chaleur, la lumière, l'électricité, le magnétisme et les forces moléculaires. Nous avons vu

que toutes ces actions sont purement mécaniques; d'où la conjecture qu'il en est de même de la force à laquelle obéissent les astres, et bien qu'il nous soit impossible de pénétrer jusqu'au fond d'un problème aussi difficile, nous avons montré qu'il n'y a aucune absurdité à expliquer la gravitation par le mouvement.

La mécanique moléculaire est aujourd'hui dans le même état où se trouvait la mécanique céleste au temps de Kepler. Ce grand homme connaissait les lois particulières des mouvements, mais il ignorait celle qui les comprend toutes; à Newton était réservé la gloire de découvrir le principe. Dans un avenir prochain, les ombres qui enveloppent ces vastes et ardus problèmes, disparaîtront, nous en sommes convaincus; aussi notre seul but en écrivant ces pages a été de solliciter les recherches dans la voie nouvelle; et nous dirons avec le poëte ;

... Fungar vice cotis, acutum
Reddere quæ ferrum valet exsors ipsa secandi.

(Horace.)

28 février 1869.

FIN

ERRATA

Page 15, ligne 18, *au lieu de :* 75 kilogrammes, *lisez :* 75 kilogrammètres.
— 15, — 20, *au lieu de :* hauteur de 1 mètre, *lisez :* hauteur de 75 mètres.
— 19, — 16, *au lieu de :* M. Joule, *lisez :* M. Favre.
— 32, — 10, *au lieu de :* sera 1033 kilogrammes, *lisez :* sera 10333 kilogrammes.
— 45, — 23, *au lieu de :* corps dur, *lisez :* un corps dur.
— 72, — 33, *au lieu de :* elle se rapproche, *lisez :* elles se rapprochent.
— 75, — 21, dans le titre du chapitre, *au lieu de :* VAPORISATION DU ZÉRO, *lisez :* VAPORISATION. DU ZÉRO.
— 85, — 27, *au lieu de :* l'épuisent peu en, *lisez :* l'épuisent peu à peu en.
— 103, — 13, *au lieu de :* employée pour la, *lisez :* déployée dans la.
— 131, — 26, *au lieu de :* plomb, 5,0196, *lisez :* plomb, 0,0196.
— 166, — 27. *au lieu de :* 600 environ, *lisez :* 600° environ.
— 184, — 23, *au lieu de :* ondes sonores, *lisez :* ombres sonores.
— 213, — 29, *au lieu de :* d'élasticité, *lisez :* de vitesse.
— 234, — 10, *au lieu de :* les plantes soit, *lisez :* les plantes, soit.
— 247, — 30, *au lieu de :* l'onde isolée, *lisez :* l'onde solitaire.
— 265, — 21, *au lieu de :* et ces deux plans seront perpendiculaires au plan de polarisation, *lisez :* et ces deux plans des oscillations seront perpendiculaires aux plans de polarisation.
— 288, — 13, *au lieu de :* d'une sphère ou d'un ellipsoïde, *lisez :* d'une sphère et d'un ellipsoïde.
— 289, — 21, *au lieu de :* rencontrerait par un, *lisez :* rencontrerait un.
— 315, — 20, *au lieu de :* ne peut être qu'un certain, *lisez :* ne peut être un certain.
— 322, — 5, *au lieu de :* $\frac{f}{f'}$, *lisez :* $\frac{t}{t'}$.
— 329, — 35, *au lieu de :* ainsi un liquide, une, *lisez :* ainsi une.
— 335, — 31, *au lieu de :* matière, *lisez :* matière pondérable.
— 339, — 4, *au lieu de :* substance; dans le même temps un courant, *lisez :* substance dans le même temps; un courant.

TABLE DES CHAPITRES

LIVRE I

DU CALORIQUE

LIVRE II

DE LA LUMIÈRE

LIVRE III

DE L'ÉLECTRICITÉ

LIVRE IV

CONSTITUTION DE LA MATIÈRE

FIN DE LA TABLE DES CHAPITRES

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.









